

ISSN 2078-4481

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ВІСНИК

**ХЕРСОНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

1(96)

Рекомендовано до друку Вченою радою
Херсонського національного технічного університету
(протокол № 9 від 24.02.2026 року)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України
категорії «Б» зі спеціальностей: C1, D1, D2, D3, D5, D7, J3
(Наказ МОН України від 17.03.2020 № 409);
D4 (Наказ МОН України від 29.06.2021 № 735);
J5, J6, J7, J8, F2, F3, F5, F6, F7, G7, G8, G9, G11
(Наказ МОН України від 02.07.2020 № 886);
G1, G3, G4, G15 (Наказ МОН України від 24.09.2020 № 1188)

Журнал включено до наукометричних баз, електронних бібліотек та репозитаріїв:
GoogleScholar, Crossref, National Library of Ukraine (Vernadsky)



Видавничий дім
«Гельветика»
2026

Редакційна колегія

Головний редактор

Шерстюк В. Г.

д.т.н., професор, проректор з навчальної роботи

Заступник головного редактора

Сарібекова Ю. Г.

д.т.н., професор

Відповідальний секретар

Лур'є І. А.

к.т.н., доцент, начальник навчально-методичного відділу, доцент кафедри інформатики і комп'ютерних наук

Члени редакційної колегії

Баганов Є. О.	к.т.н., доцент
Березовський Ю. В.	д.т.н., доцент
Бойко Г. А.	к.т.н., доцент
Вороненко М. О.	к.т.н., доцент
Гончар О. І.	д.е.н., професор
Горбачов П. Ф.	д.т.н., професор
Дімітрова В.	д.н., доцент
Джерелюк Ю. О.	д.е.н., професор
Євтушенко В. В.	к.т.н., доцент
Жарікова М. В.	д.т.н., професор
Зубкова К. В.	к.т.н., доцент
Корчевська Л. О.	д.е.н., професор
Кузьміна Т. О.	д.т.н., професор
Куник О. М.	к.т.н., доцент
Луб'яний П. В.	к.т.н., доцент
Наумов О. Б.	д.е.н., професор
Олійник Н. М.	к.т.н., доцент
Плющ Р. М.	д.держ.упр., професор
Половцев О. В.	д.держ.упр., к.т.н., професор
Рудакова Г. В.	д.т.н., професор
Русанов С. А.	к.т.н., доцент
Савін С. Ю.	д.е.н., доцент
Салєба Л. В.	к.т.н., доцент
Семешко О. Я.	д.т.н., професор
Сідельникова Л. П.	д.е.н., професор
Smolarz A. (Польща)	dr.hab.inz.
Стоянова О. В.	к.т.н., доцент
Топалова Е. Х.	к.держ.упр., доцент
Філіппова В. Д.	д.держ.упр., професор
Хрущ Н. А.	д.е.н., професор
Чепелюк О. В.	д.т.н., професор
Шандова Н. В.	д.е.н., професор
Шарко О. В.	д.т.н., професор
Шарко М. В.	д.е.н., професор
Шевченко І. І.	д.т.н., професор

ISSN 2078-4481

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
KHERSON NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY**

VISNYK

**OF KHERSON NATIONAL
TECHNICAL UNIVERSITY**

1(96)

Recommended for publication by the Academic Council
of Kherson National Technical University
(Minutes № 9 on 24th February 2026)

The journal is included in the List of Scientific Professional Editions of Ukraine Category "B"
in specialties: C1, D1, D2, D3, D5, D7, J3
(Ukraine Education and Science Ministry Order dated 17.03.2020, № 409);
D4 (Ukraine Education and Science Ministry Order dated 29.06.2021, № 735);
J5, J6, J7, J8, F2, F3, F5, F6, F7, G7, G8, G9, G11
(Ukraine Education and Science Ministry Order dated 02.07.2020, № 886);
G1, G3, G4, G15
(Ukraine Education and Science Ministry Order dated 24.09.2020, № 1188)
The journal is included in the scientometric bases, electronic libraries and repositories:
Google Scholar, Crossref, National Library of Ukraine (Vernadsky)



Publishing House
"Helvetica"
2026

Editorial Board

Editor-in-Chief

Sherstiuk V. H.
DSc (Engineering), Professor, Vice-Rector for Academic Affairs

Deputy Editor-in-Chief

Saribekova Yu. G.
Doctor of Engineering Science, Professor

Executive Secretary

Lurie I. Yu.
PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Educational and Methodical Department, Associate Professor of the Department of Informatics and Computer Sciences

Members of Editorial Board

Baganov Ye. O.	Ph.D., Associate Professor
Berezovsky Yu. V.	Doctor of Engineering Science, Associate Professor
Boiko H. A.	Ph.D., Associate Professor
Voronenko M. O.	Ph.D., Associate Professor
Honchar O. I.	Doctor of Economic Sciences, Professor
Horbachov P. F.	Doctor of Economics, Professor
Dimitrova V. Ya. (Bulgaria)	Ph.D., Associate Professor
Dzhereliuk Yu. A.	Doctor of Economics, Professor
Yevtushenko V. V.	Ph.D., Associate Professor
Zharikova M. V.	Doctor of Engineering Science, Professor
Zubkova K. V.	Ph.D., Associate Professor
Korchevska L. A.	Doctor of Economics, Professor
Kuzmina T. O.	Doctor of Technical Sciences, Professor
Kunyk O. N.	Ph.D., Associate Professor
Lubianyi P. V.	Ph.D., Associate Professor
Naumov O. B.	Doctor of Economics, Professor
Oliinyk N. M.	Ph.D., Associate Professor
Pliushch R. M.	Doctor of Sciences in Public Administration, Professor
Polovtsev O. V.	Doctor of Sciences in Public Administration, Professor
Rudakova H. V.	Doctor of Engineering Science, Professor
Rusanov S. A.	Ph.D., Associate Professor
Savin S. Yu.	Doctor of Economics, Associate Professor
Saleba L. V.	Ph.D., Associate Professor
Semeshko O. Ya.	Doctor of Engineering Science, Professor
Sidelnikova L. P.	Doctor of Economics, Professor
Smolarz A. (Poland)	Ph.D., Associate Professor
Stoianova O. V.	Ph.D., Associate Professor
Topalova E. K.	Ph.D., Associate Professor
Filippova V. D.	Doctor of Science in Public Administration, Professor
Khrushch N. A.	Doctor of Economics, Professor
Chepeliuk O. V.	Doctor of Technical Sciences, Professor
Shandova N. V.	Doctor of Economics, Professor
Sharko M. V.	Doctor of Economics, Professor
Sharko O. V.	Doctor of Engineering Science, Professor
Shevchenko I. I.	Doctor of Technical Sciences, Professor

ЗМІСТ

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

В. М. Болдовський, Н. В. Кобріна, А. М. Григорович. Способи модернізації машинобудівних підприємств України в сучасних умовах.....	11
О. А. Бурлака, О. Ю. Проценко. Підвищення якості транспортування та розвантаження зерна у вертикально розташованій ковшовій норії елеваторного обладнання.....	17
В. І. Воробйова, І. В. Гнатко, М. І. Скиба. Квантово-хімічний скринінг гідрофобних низькотемпературних евтектичних розчинників на основі монотерпеноїдів.....	25
Д. О. Дмитрієв, А. М. Кириченко, М. Ф. Кузмічов. Цифрові двійники смартпромисловості в машинобудівних технологіях і інженерній освіті.....	34
К. В. Доля. Визначення оптимальної маршрутної швидкості їздки при експлуатації автомобільних засобів транспорту в пасажирських перевезеннях.....	41
Р. М. Ігнатюк, О. С. Стадник, О. П. Рижий, Л. С. Серілко, В. Л. Пахаренко. Аналіз можливості застосування двомасового маховика в трансмісії електромобіля.....	50
О. В. Іщенко, І. В. Охріменко. Розробка та дослідження властивостей гідрогелевих матеріалів на основі желатину для трансдермальних систем доставки ліків.....	59
А. О. Келемеш, А. М. Хмеленко. Комбіновані технології очищення відпрацьованих моторних оливи для інженерних гідросистем.....	65
О. В. Ключев, О. В. Садовой, Ю. В. Сохіна. Структурний синтез спостерігача швидкості ротора машини подвійного живлення.....	72
А. А. Кочина, І. С. Наглюк, Л. С. Абрамова, С. А. Сахно. Методика формування моделі транспортного попиту на пересування пасажиріву приміському сполученні на основі закономірностей розподілу відстаней поїздок.....	81
О. Ф. Кузькін, І. М. Райда, Л. А. Веремесенко. Загальний аналіз інформаційного забезпечення автобусних перевезень в умовах військового стану.....	87
В. Б. Кулик, О. М. Роїк, І. В. Ресницький, Є. В. Журавель. Дослідження активності та стабільності протеолітичних ензимів косметичної пудри у порошковій формі.....	94
В. В. Курак, О. В. Андропова, А. В. Любезний. Рівняння для оцінки річного обсягу виробленої енергії фотоелектричним масивом.....	99
Д. А. Кучинська, Р. М. Москаль. Особливості технології отримання екструдованих полімерних композицій на основі крохмалю з додаванням лимонної кислоти.....	105
В. М. Лазорик, І. А. Селіверстов. Підвищення зносостійкості плазмових покриттів застосуванням наноструктурних компонентів.....	111
Ю. Є. Мешков. Виробничо-технічна база підприємств як основа формування розвитку систем технічного обслуговування та ремонту транспортних засобів.....	118
С. М. Мінакова, О. В. Степанов, Т. В. Волобуєва. Стратегія управління механізмом розвитку транспортного комплексу.....	124
В. С. Парненко, Є. В. Корбут. Екологічно орієнтовані технології з'єднання та складання у контексті сталого виробництва.....	129
С. А. Русанов, В. О. Проценко, О. І. Ключев, І. А. Шатохіна. Моделювання гідродинаміки та теплообміну спіральньо-капсульного теплоаккумулятору для теплової підготовки автомобільних двигунів внутрішнього згоряння засобами CAE-систем.....	137
А. П. Слюсар, І. Ш. Невлюдов, С. В. Хрустальова. Інтелектуальна автоматизована система моніторингу дефектів конвеєрних стрічок на основі нейромережових алгоритмів комп'ютерного зору.....	145
Yu. M. Fedenko. Review of methods for preparing highly purified water for injections. Environmental aspects.....	154
Цинь С., Є. В. Любий. Оцінювання можливостей інтервальної концепції в підвищенні достовірності результатів моделювання транспортного попиту.....	159
О. О. Чупринін. Скінченоеlementне моделювання при аналізі тривалої міцності циліндричних ангарів різної довжини.....	165
А. П. Шевченко, І. В. Трофименко, Н. С. Урум, А. О. Трофименко. Вплив гідрометеорологічних умов на морехідність судна: критерії безпеки та алгоритм прийняття рішень.....	170

ТЕХНОЛОГІЯ ЛЕГКОЇ ТА ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

В. Г. Єфімова. Розробка технології отримання біологічно активних добавок з відходів переробки біомаси ялини.....	179
Л. В. Салєба, В. П. Нестерук, О. Я. Семешко. Використання інулiнвмісної сировини у технології функціонального пісочного печива.....	185

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

M. V. Bautina. Resilience of artificial intelligence systems to adversarial queries and jailbreak attacks.....	193
V. V. Bondar. Inference-time scaling as a universal principle in machine learning: classification and cross-domain analysis.....	200
О. В. Веретюк, Н. А. Андрушак. Оптимізація нейронних мереж в дифузійних моделях для генерації ескізів з використанням кривих Без'є.....	207
С. М. Волянський, С. В. Руденко, Л. О. Добровольська, А. В. Козачук Функціонально-операторна методологія динамічного моделювання автономних морських технічних систем.....	217
Є. В. Горбатюк, О. О. Дудник, Ю. Л. Гунько. Роль edge computing у зменшенні затримок під час оброблення даних в автономних системах.....	226
Г. В. Григорчук, Л. І. Григорчук, О. В. Григорчук. Нейромережевий soft-sensor для комп'ютерної діагностики вологості.....	234
О. В. Гриненко, В. К. Ободяк, М. С. Отрошенко, І. О. Пугач, А. О. Теницька. Кібератаки на бортові системи безпілотних літальних апаратів та методи протидії на основі машинного навчання.....	242
Е. К. Доля, О. Є. Доля. Надійність механізмів автентифікації в інформаційних системах: вплив людського фактора.....	250
О. В. Кузьменко. Аналіз та порівняння деяких моделей data science в контексті їх застосування для макроекономічного прогнозування.....	260
В. А. Лабчук. Small Data як персоналізоване рішення для формування стратегії корекції ваги людини.....	266
Л. М. Михайлова, С. В. Василюк-Зайцева, О. В. Ременяк. Біомедичне моделювання кровообігу для покращення ефективності серцево-судинних імплантатів.....	271
С. О. Примиська, В. М. Куліков, О. О. Базиль. Застосування технологій штучного інтелекту для прогнозування відмов у хмарних інфраструктурах.....	280
I. O. Rozlomii, V. H. Babenko, V. M. Zazhoma. Architecture of a modular expert system for verification of security policies in multi-tier information environments.....	289
В. П. Романенко, Н. О. Чікіна, В. І. Некрутенко. Прогнозування навантаження в телекомунікаційних мережах п'ятого покоління на основі Big Data.....	296
В. О. Романець, О. В. Бісікало. Інформаційна технологія інтелектуального аналізу відеопотоку дорожнього руху на основі Edge-Cloud архітектури.....	304
І. П. Сініцин, О. П. Ільїна, С. Я. Скибик, О. А. Яценко. Моделювання та оцінювання властивостей адаптивного ансамблевого індикатора діагностики стратегічної ресурсної безпеки розподіленої організаційної системи.....	311
М. О. Слабінога, П. С. Осташа. Розробка функціонального модуля цифрового супроводу діяльності колегіальних органів у єдиної інформаційної системи університету.....	323
А. В. Соколов, В. М. Слатвінська, В. І. Бевза. Виявлення аномалій у трафіку мобільних пристроїв за допомогою машинного навчання.....	328
Т. Г. Старушенко. Інформаційна ентропія обчислювальних стандартів ієєе 754: теоретичний аналіз та практичні наслідки.....	334
А. В. Стьопкін. Алгоритм розпізнавання графів колективом агентів.....	338
О. М. Супрун, Я. Я. Кравчук, О. О. Супрун. Гібридні архітектури штучного інтелекту для прогнозування поведінкових аномалій у мережевому трафіку.....	345
Р. О. Тичковський, Д. Д. Поварчук. Комплексна архітектура високодоступної хмарної інфраструктури з автоматичним масштабуванням та інтегрованим моніторингом в Amazon Web Services.....	353

І. В. Філіппенко, В. І. Сергієнко, О. І. Філіппенко, І. В. Хаханова. Модель адаптивної системи корекції помилок у комп'ютерних системах.....	359
Д. Д. Чумичов. Застосування технології просторових трансформерів у задачі нейромережевої класифікації сільськогосподарських угідь на основі даних супутників Sentinel.....	368
І. О. Шаклеїна, А. Т. Савшак, О. Т. Шаклеїн. Метод зниження хибних спрацювань у системах виявлення вторгнень на основі порогової фільтрації та Gradient Boosting.....	377
С. М. Шевченко, Ю. Д. Жданова, С. Д. Мельничук. Автоматизація когнітивного моделювання ризиків інформаційної безпеки: досвід використання Mental Modeler та FCM Expert.....	383
В. Г. Шерстюк, С. А. Щербанюк. Формальна модель сценарно-прецедентної координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів та алгоритм її адаптації у динамічних середовищах.....	396
О. М. Шибко, С. Ю. Шафоренко, А. В. Аврята. Порівняльний аналіз сучасних методологій проектування ІС: UML, BPMN, ArchiMate.....	405
О. М. Шушура, К. В. Новицький, В. О. Іванов. Автоматичне резюмування наукових документів на основі моделей-трансформерів.....	411

УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

А. І. Пляскіна, А. В. Бериславська. Рефлексія управління експортними підприємствами в ситуаціях з високим рівнем невизначеності.....	419

ПУБЛІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

О. В. Григораш. Реформи фінансування вищої освіти у країнах ОЕСР: аналіз механізмів та класифікація підходів.....	425
В. М. Демченко. Державна політика в галузі національної безпеки в умовах воєнного стану.....	432
А. С. Карапінка. Негативна регламентація у структурі механізму регулювання публічно-приватних відносин.....	439

CONTENTS

ENGINEERING SCIENCES

V. M. Boldovsky, N. V. Kobrina, A. M. Grigorovich. Ways to modernize machine-building enterprises of Ukraine in modern conditions.....	11
O. A. Burlaka, O. Yu. Protsenko. Improving the quality of grain transportation and unloading in a vertically located bucket conveyor of elevator equipment.....	17
V. I. Vorobyova, I. V. Gnatko, M. I. Skiba. Quantum chemical screening of hydrophobic deep eutectic solvents based on monoterpenoids.....	25
D. O. Dmytriiev, A. M. Kyrychenko, M. F. Kuzmichov. Technical and technological solutions in the component design of metal alloy 3D-printing equipment.....	34
K. V. Dolia. Determination of optimal route driving speed when using vehicles in passenger transportation.....	41
R. M. Ihnatiuk, O. S. Stadnyk, O. P. Ryzhyi, L. S. Serilko, V. L. Pakhareenko. Analysis of the feasibility of applying a dual-mass flywheel in an electric vehicle transmission.....	50
O. V. Ishchenko, I. V. Okhrimenko. Development and research of the properties of gelatin-based hydrogel materials for transdermal drug delivery systems.....	59
A. O. Kelemesh, A. M. Khmelenko. Combined Technologies for the Purification of Used Motor Oils for Engineering Hydraulic Systems.....	65
O. V. Kliuiev, O. V. Sadovoi, Yu. V. Sokhina. Structural synthesis of a rotor speed observer for a doubly fed machine.....	72
A. A. Kochina, I. S. Nahliuk, L. S. Abramova, S. A. Sakhno. Methodology for forming a transport demand model for passenger mobility in suburban transport based on trip distance distribution patterns.....	81
O. F. Kuzkin, I. M. Raida, L. A. Veremeienko. General analysis of information support for bus transportation in war conditions.....	87
V. B. Kulyk, O. M. Roik, I. V. Resnytskyi, Ye. V. Zhuravel. Research of activity and stability of proteolytic enzymes in powdered cosmetic powder.....	94
V. V. Kurak, O. V. Andronova, A. V. Liubeznyi. Expression for estimating the annual volume of energy produced by a photoelectric array.....	99
D. A. Kuchynska, R. M. Moskal. Specific features of the technology for obtaining extruded polymer compositions based on starch addition with citric acid.....	105
V. M. Lazoryk, I. A. Sieliverstov. Increasing the wear resistance of plasma coatings by using nanostructured components.....	111
Yu. Ye. Mieshkov. The production and technical base of enterprises as a basis for the development of vehicle maintenance and repair systems.....	118
S. M. Minakova, O. V. Stepanov, T. V. Volobuyeva. Strategy for managing the transport complex development mechanism.....	124
V. S. Parnenko, Ye. V. Korbut. Environmentally oriented joining and assembly technologies in the context of sustainable manufacturing.....	129
S. A. Rusanov, V. O. Protsenko, O. I. Kliuiev, I. A. Shatokhina. Modeling of hydrodynamics and heat transfer in a spiral-capsule thermal energy storage unit for thermal preparation of automotive internal combustion engines using cae systems.....	137
A. P. Sliusar, I. Sh. Nevliudov, S. V. Khrustalova. Intelligent automated system for monitoring defects in conveyor belts based on neural network algorithms of computer vision.....	145
Yu. M. Fedenko. Review of methods for preparing highly purified water for injections. Environmental aspects.....	154
Qin X., Ye. V. Liubyi. Assessing the potential of the interval concept in improving the reliability of transport demand modeling results.....	159
O. O. Chuprynin. Finite element modeling in analysis of long-term strength of cylindrical hangars of various lengths.....	165
A. P. Shevchenko, I. V. Trofymenko, N. S. Urum, A. O. Trofymenko. Influence of hydrometeorological conditions on ship seaworthiness: safety criteria and decision-making algorithm.....	170

THE TECHNOLOGY OF LIGHT AND FOOD INDUSTRY

V. G. Yefimova. Development of technology for obtaining biologically active additives from waste from processing spruce biomass.....	179
L. V. Saleba, V. P. Nesteruk, O. Ya. Semeshko. Use of inulin-containing raw materials in the technology of functional shortbread cookies.....	185

INFORMATION TECHNOLOGIES

M. V. Bautina. Resilience of artificial intelligence systems to adversarial queries and jailbreak attacks.....	193
V. V. Bondar. Inference-time scaling as a universal principle in machine learning: classification and cross-domain analysis.....	200
O. V. Veretiuk, N. A. Andrushchak. Optimization of neural networks in diffusion models for sketch generation using bezier curve.....	207
S. M. Volyanskiy, S. V. Rudenko, L. O. Dobrovolska, A. V. Kozachuk. A functional-operator framework for the evolution modeling of autonomous maritime technical systems.....	217
I. V. Gorbatyuk, O. O. Dudnyk, Y. L. Hunko. The role of edge computing in reducing latency during data processing in autonomous systems.....	226
G. V. Grygorchuk, L. I. Grygorchuk, O. V. Hryhorchuk. Neural network soft-sensor for computer-based moisture diagnostics.....	234
O. V. Hrynenko, V. K. Obodiak, M. S. Otroshchenko, I. O. Puhach, A. O. Tenytska. Cyberattacks on on-board systems of unmanned aerial vehicles and methods of countering them based on machine learning.....	242
E. K. Dolia, O. E. Dolia. Reliability of authentication mechanisms in information systems: the influence of the human factor.....	250
O. V. Kuzmenko. Analysis and comparison of selected data science models in the context of their application to macroeconomic forecasting.....	260
V. A. Labchuk. Small data as a personalized solution for formation of the strategy of the person's weight correction.....	266
L. M. Mykhailova, S. V. Vasylyuk-Zaitseva, O. V. Remeniak. Biomedical modeling of the circulation to improve the efficiency of cardiovascular implants.....	271
S. O. Prymyska, V. M. Kulikov, O. O. Bazyl. Using artificial intelligence technologies to predict failures in cloud infrastructures.....	280
I. O. Rozlomii, V. H. Babenko, V. M. Zazhoma. Architecture of a modular expert system for verification of security policies in multi-tier information environments.....	289
V. P. Romanenko, N. O. Chikina, V. I. Nekrutenko. Forecasting load in fifth generation telecommunication networks based on Big Data.....	296
V. O. Romanets, O. V. Bisikalo. Information technology for intelligent traffic video stream analysis based on Edge-Cloud architecture.....	304
I. P. Sinitsyn, O. P. Ilina, S. Ya. Skybyk, O. A. Yatsenko. Modeling and evaluation of the properties of an adaptive ensemble indicator for diagnosing the strategic resource security of a distributed organizational system.....	311
M. O. Slabinoha, P. S. Ostasha. Development of a functional module for digital support of the activities of collegial bodies in the unified information system of the university.....	323
A. V. Sokolov, V. M. Slatvinska, V. I. Bevza. Detection of anomalies in mobile traffic using machine learning.....	328
T. H. Starushenko. Information entropy of iec 754 computing standards: theoretical analysis and practical implications.....	334
A. V. Stopkin. Graph exploration algorithm by a team of agents.....	338
O. M. Suprun, Ya. Ya. Kravchuk, O. O. Suprun. Hybrid artificial intelligence architectures for predicting behavioral anomalies in network traffic.....	345
R. O. Tychkovskiy, D. D. Povarchuk. Comprehensive architecture of highly available cloud infrastructure with auto-scaling and integrated monitoring in amazon web services.....	353
I. V. Filippenko, V. I. Serhiienko, O. I. Filippenko, I. V. Hahanova. Model of adaptive error correction system in computer systems.....	359

D. D. Chumychov. Using spatial transformer technology in the task of neural network classification of agricultural fields based on sentinel satellite images.....	368
I. O. Shakleina, A. T. Savshak, O. T. Shaklein. Method for reducing false accounts in intruder detection systems based on threshold filtering and gradient boosting.....	377
S. M. Shevchenko, Yu. D. Zhdanova, S. D. Melnychuk. Automation of cognitive modeling of information security risks: experience of using mental modeler and fcm expert.....	383
V. G. Sherstyuk, S. A. Shcherbaniuk. Formal model of scenario-precedent coordination of heterogeneous unmanned aerial vehicle ensembles and its adaptation algorithm in dynamic environments.....	396
O. M. Shybko, S. Yu. Shaforenko, A. V. Avriata. Comparative analysis of modern is design methodologies: uml, bpmn, archimate.....	405
O. M. Shushura, K. V. Novytskyi, V. O. Ivanov. Automatic summarisation of scientific documents based on transformer-models.....	411

MANAGEMENT AND ADMINISTRATION

A. I. Plyaskina, A. V. Berislavska. Reflection on the management of export enterprises in situations with a high level of uncertainty.....	419

PUBLIC MANAGEMENT AND ADMINISTRATION

O. V. Hryhorash. Reforms of higher education funding in oecd countries: analysis of mechanisms and classification of approaches.....	425
V. M. Demchenko. State policy in the national security direction under martial law.....	432
A. S. Karapinka. Negative regulation within the structure of regulatory mechanism of public-private relations.....	439

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 629.08

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.1.1>**В. М. БОЛДОВСЬКИЙ**

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автомобілів і транспортної інфраструктури
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
ORCID: 0009-0008-5069-756X

Н. В. КОБРИНА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автомобілів і транспортної інфраструктури
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0001-9499-2079

А. М. ГРИГОРОВИЧ

старший викладач кафедри автомобілів і транспортної інфраструктури
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0001-5388-3159

СПОСОБИ МОДЕРНІЗАЦІЇ МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВ УКРАЇНИ В СУЧАСНИХ УМОВАХ

У статті досліджено сучасний стан машинобудівної галузі України та визначено ключові проблеми її розвитку в умовах глобалізації, цифрової трансформації економіки та військово-економічних викликів. Обґрунтовано необхідність комплексної модернізації машинобудівних підприємств як стратегічної умови підвищення їх конкурентоспроможності.

Розглянуто актуальні питання модернізації машинобудівних підприємств України в умовах сучасних економічних, технологічних та геополітичних викликів. Підкреслено роль машинобудування як базової галузі національної економіки, що визначає рівень технологічного розвитку держави, її експортний потенціал та економічну безпеку. Проведено комплексний аналіз сучасного стану машинобудівної галузі, виявлено основні проблеми функціонування підприємств, зокрема високий рівень зносу основних фондів, низьку рентабельність виробництва, обмежені інвестиційні ресурси та дефіцит кваліфікованих кадрів.

У роботі узагальнено теоретичні підходи до трактування поняття модернізації та обґрунтовано необхідність її комплексної реалізації. Визначено основні напрями модернізації машинобудівних підприємств, серед яких технологічне оновлення виробництва, цифровізація та впровадження концепції Industry 4.0, інвестиційне фінансування, розвиток людського капіталу та державна промислова політика. Розглянуто можливості застосування сучасних інженерних та інформаційних технологій, включаючи CAD/CAM/CAE системи, ERP та MES платформи, верстати з числовим програмним керуванням та адитивні виробничі технології.

Запропоновано алгоритм впровадження модернізаційних заходів на підприємствах, який передбачає проведення технічного аудиту, розробку стратегії розвитку, поетапна реалізація інновацій та оцінку їх економічної ефективності. Проаналізовано основні ризики та межі модернізаційних процесів, а також визначено перспективи розвитку машинобудівної галузі України. Висновки статті підтверджують, що модернізація є ключовою умовою підвищення конкурентоспроможності машинобудівних підприємств та забезпечення сталого економічного розвитку держави.

Ключові слова: машинобудування, модернізація, цифровізація, інновації, інвестиції, промислова політика, конкурентоспроможність.

V. M. BOLDOVSKYI

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automobiles
and Transport Infrastructure
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
ORCID: 0009-0008-5069-756X



© В. М. Болдовський, Н. В. Кобрина, А. М. Григорович, 2026
Стаття поширюється на умовах відкритої ліцензії CC BY 4.0

N. V. KOBRINA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automobiles
and Transport Infrastructure
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0001-9499-2079

A. M. GRIGOROVICH

Senior Lecturer at the Department of Automobiles and Transport Infrastructure
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0001-5388-3159

WAYS TO MODERNIZE MACHINE-BUILDING ENTERPRISES OF UKRAINE IN MODERN CONDITIONS

The article examines the current state of the machine-building industry of Ukraine and identifies the key problems of its development in the context of globalization, digital transformation of the economy and military-economic challenges. The author substantiates the need for comprehensive modernization of machine-building enterprises as a strategic condition for increasing their competitiveness.

The article addresses current issues of modernization of machine-building enterprises in Ukraine under modern economic, technological, and geopolitical challenges. The role of mechanical engineering as a fundamental sector of the national economy is emphasized, as it determines the level of technological development of the state, its export potential, and economic security. A comprehensive analysis of the current state of the machine-building industry is carried out, and the main problems of enterprise operation are identified, including a high level of depreciation of fixed assets, low production profitability, limited investment resources, and a shortage of qualified personnel.

The paper generalizes theoretical approaches to the interpretation of the concept of modernization and substantiates the necessity of its comprehensive implementation. The main directions of modernization of machine-building enterprises are identified, including technological renewal of production, digitalization and implementation of the Industry 4.0 concept, investment support, development of human capital, and active state industrial policy. The possibilities of applying modern engineering and information technologies are considered, including CAD/CAM/CAE systems, ERP and MES platforms, computer numerical control machines, and additive manufacturing technologies.

An algorithm for implementing modernization measures at enterprises is proposed, which involves conducting a technical audit, developing a development strategy, phased implementation of innovations, and evaluating their economic efficiency. The main risks and limitations of modernization processes are analyzed, and prospects for the development of the machine-building industry in Ukraine are outlined. The conclusions of the article confirm that modernization is a key condition for increasing the competitiveness of machine-building enterprises and ensuring sustainable economic development of the state.

Key words: machine building, modernization, digitalization, innovation, investment, industrial policy, competitiveness.

Постановка проблеми

Машинобудування традиційно відіграє ключову роль у формуванні промислового потенціалу держави, забезпечуючи виробництво засобів виробництва для інших галузей економіки. В Україні машинобудівний комплекс є базовим елементом індустріальної структури, що визначає рівень технологічного розвитку країни, її експортні можливості та економічну безпеку.

В умовах сучасних викликів – трансформації світової економіки, прискорення науково-технічного прогресу, інтеграції до європейського економічного простору та наслідків воєнних дій – українські машинобудівні підприємства стикаються з необхідністю глибоких структурних змін. Застаріле обладнання, низький рівень автоматизації, обмежені фінансові ресурси та дефіцит кваліфікованих кадрів істотно знижують конкурентоспроможність вітчизняної продукції на міжнародних ринках.

У зв'язку з цим питання модернізації машинобудівних підприємств набуває особливої актуальності та потребує комплексного наукового обґрунтування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Модернізація машинобудівних підприємств України в сучасних умовах є важливою складовою економічного розвитку країни. Впровадження різних способів та методів (цифровізація та впровадження концепції Industry 4.0, технологічна модернізація та ін.), дозволяє значно підвищити ефективність виробництва, оптимізувати використання ресурсів і підвищити конкурентоспроможність вітчизняних підприємств на світовому ринку[1].

Аналіз літературних джерел свідчить про важливість модернізації підприємств України навіть в найскладніших умовах, в яких перебуває Україна[2].

У дослідженні [3] розглядається роль ефективного інвестиційного забезпечення для технологічного оновлення машинобудівного комплексу України. Автори підкреслюють, що оновлення основних фондів та впровадження

інноваційних технологій потребують значних фінансових ресурсів, для чого необхідно формувати сприятливу інвестиційну політику, що передбачає різні джерела фінансування (державні програми, кредити, іноземні інвестиції).

У публікації [4] розглядаються структурні трансформації машинобудівного комплексу України, зокрема стратегії повосенного відновлення галузі та адаптації до сучасних технологічних вимог. Вчені аналізують процеси уповільнення інноваційної активності, необхідність стратегічного планування та інтеграції інноваційних рішень у виробництво.

Дослідження [5] присвячене аналізу динаміки модернізаційних процесів на українських машинобудівних підприємствах у порівнянні з зарубіжними практиками. Автор встановлює, що темпи модернізації вітчизняних підприємств значно менші за аналогічні показники закордонних компаній, що пов'язано зі зниженим рівнем інвестиційної та інноваційної активності.

Частина досліджень підкреслює, що модернізація машинобудівних підприємств України неможлива без урахування воєнних викликів і економічної невизначеності. Наприклад, у праці [6] аналізуються наслідки зміни географічної структури машинобудування через війну, локальне впровадження технологічних ініціатив та перспективи експорту машинобудівної продукції на нові ринки.

Формулювання мети дослідження

Метою досліджень є обґрунтування необхідності модернізації машинобудівних підприємств України шляхом інтеграції сучасних технологій (цифровізація та впровадження концепції Industry 4.0, технологічна модернізація та ін.).

Для вирішення поставленої мети сформульовані наступні завдання:

Визначити основні способи модернізації машинобудівних підприємств.

Обґрунтувати доцільність впровадження сучасних способів для модернізації машинобудівних підприємств.

Викладення основного матеріалу дослідження

Сучасний стан машинобудування України характеризується неоднорідністю розвитку окремих підгалузей. Найбільш уразливими залишаються важке машинобудування, верстатобудування та транспортне машинобудування, де рівень фізичного та морального зносу основних фондів перевищує 60–70 %.

Основними проблемами галузі є зниження обсягів виробництва, скорочення експортних поставок, залежність від імпортних комплектуючих, низький рівень інноваційної активності, нестача інвестиційних ресурсів.

Ключові проблеми функціонування машинобудівних підприємств України наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Ключові проблеми функціонування машинобудівних підприємств України

Проблема	Характеристика
Зношеність основних фондів	Фізичний знос обладнання 60–80 %, моральне старіння
Низький рівень автоматизації	Переважають ручних та напівавтоматичних операцій
Дефіцит інвестицій	Обмежений доступ до кредитних та інвестиційних ресурсів
Кадрові проблеми	Відтік кваліфікованих інженерів, старіння персоналу, обмаль молодих фахівців
Низька інноваційна активність	Обмежене впровадження нових технологій
Залежність від імпорту	Імпортні комплектуючі та обладнання

Разом із тим окремі підприємства демонструють позитивні тенденції, зокрема у сегментах приладобудування, оборонної промисловості та спеціалізованого обладнання. Це свідчить про наявність потенціалу для відновлення та розвитку галузі за умови цілеспрямованої модернізації.

Модернізація машинобудівних підприємств розглядається як системний процес оновлення техніко-технологічної бази, організаційної структури та управлінських механізмів з метою підвищення ефективності виробництва.

У науковій літературі модернізація трактується як: технічне переоснащення, впровадження інновацій, оптимізація виробничих процесів, адаптація підприємства до змін зовнішнього середовища.

Важливо підкреслити, що модернізація не зводиться лише до заміни обладнання, а передбачає комплексний підхід, що охоплює технологічні, економічні, соціальні та управлінські аспекти діяльності підприємства.

Проведення модернізації машинобудівних підприємств – це складний, тривалий та витратний процес, який залежить від багатьох факторів. Основні складові модернізації машинобудівного підприємства наведені на рис. 1.

Технологічна модернізація є базовим напрямом розвитку машинобудівних підприємств. Вона передбачає заміну застарілих верстатів на сучасне високоточне обладнання, впровадження верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК), використання адитивних технологій, автоматизацію складальних операцій.

Основні напрями технологічного оновлення машинобудівних підприємств перелічені в табл. 2.

Застосування сучасних технологій дозволяє суттєво підвищити продуктивність праці, знизити витрати матеріалів і енергії, а також покращити якість продукції.

Одним із ключових трендів сучасного машинобудування є цифрова трансформація. Впровадження елементів Industry 4.0 включає використання CAD/CAM/CAE-систем, впровадження ERP- та MES-систем, застосування цифрових двійників, інтеграцію систем моніторингу обладнання в режимі реального часу.



Рис. 1. Основні складові модернізації машинобудівного підприємства

Таблиця 2

Основні напрями технологічного оновлення машинобудівних підприємств

Напря́м	Інструменти впровадження	Очікуваний ефект
Механічна обробка	Верстати з ЧПК	Підвищення точності та продуктивності
Складальні процеси	Роботизовані комплекси	Зменшення трудомісткості
Проектування	CAD/CAM/CAE системи	Скорочення термінів розробки
Контроль якості	Цифрові вимірні системи	Зменшення браку
Логістика	Автоматизовані склади	Оптимізація матеріальних потоків

Можливий варіант, інтеграція цифрових систем у машинобудівному виробництві наведено на рис. 2.

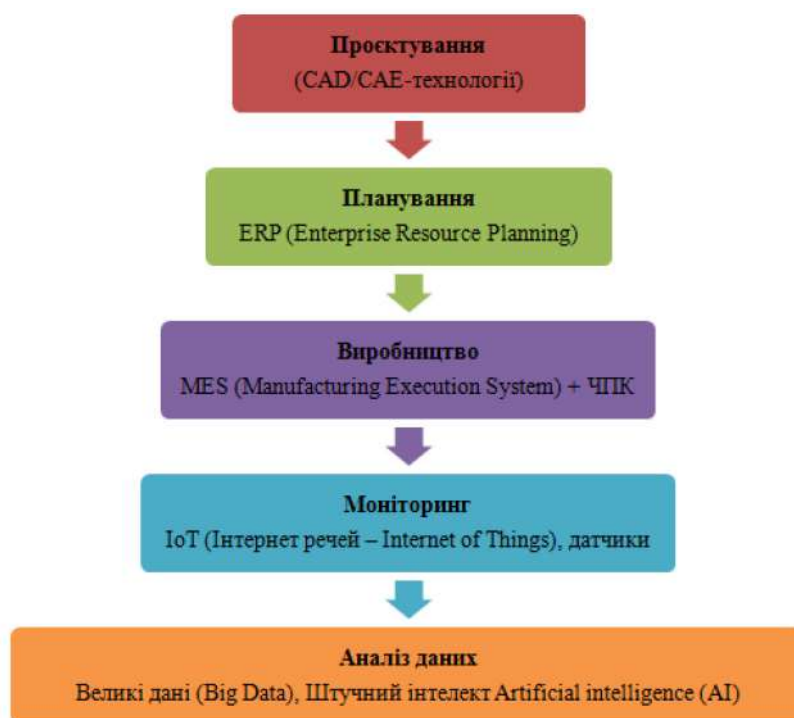


Рис. 2. Інтеграція цифрових систем у машинобудівному виробництві

Цифровізація дозволяє оптимізувати виробничі процеси, зменшити простой обладнання та забезпечити гнучкість виробництва.

Реалізація модернізаційних заходів потребує значних фінансових ресурсів. Основними джерелами інвестицій можуть бути власні кошти підприємств, банківські кредити, державні програми підтримки, іноземні інвестиції, грантові та міжнародні програми. Перелік джерел фінансування модернізаційних процесів на підприємствах наведено в табл. 3.

Підвищення інвестиційної привабливості підприємств можливе за умови прозорості фінансової діяльності, ефективного корпоративного управління та чіткої стратегії розвитку. В умовах впровадження нових технологій зростає потреба у фахівцях з програмування ЧПК-обладнання, автоматизації виробництва, управління цифровими системами, інженерного проектування. Підприємства мають інвестувати у підвищення кваліфікації персоналу,

Таблиця 3

Джерела фінансування модернізаційних процесів на підприємствах

Джерело фінансування	Переваги	Недоліки
Власні кошти	Незалежність	Обмежений обсяг
Банківські кредити	Швидкий доступ	Висока відсоткова ставка
Державні програми	Пільгові умови	Бюрократичні процедури
Іноземні інвестиції	Доступ до технологій	Інвестиційні ризики
Гранти	Безповоротні кошти	Обмежена сфера застосування

співпрацю з закладами вищої освіти та розвиток внутрішніх навчальних центрів. Ефективна модернізація машинобудування неможлива без активної ролі держави.

Основними напрямками державної підтримки є формування довгострокової промислової стратегії, податкові стимули для інноваційних підприємств, підтримка експорту машинобудівної продукції, розвиток промислових кластерів, державні замовлення та гарантії.

Державна промислова політика має бути спрямована на створення сприятливих умов для розвитку високотехнологічного машинобудування.

Практична реалізація модернізаційних заходів передбачає проведення технічного аудиту підприємства, розробку стратегії модернізації, поетапне впровадження інновацій, оцінку ефективності впроваджених рішень. Етапи реалізації модернізаційних заходів на підприємствах наведено на рис. 3.

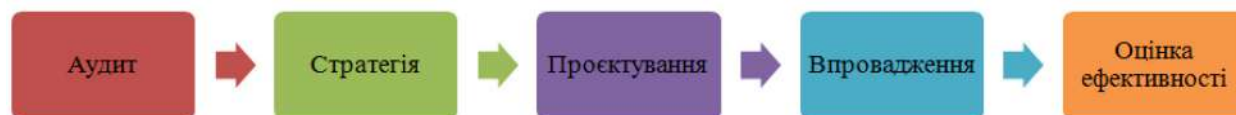


Рис. 3. Етапи реалізації модернізаційних заходів на підприємствах

Важливим є поєднання технічних і організаційних змін, що дозволяє мінімізувати ризики та забезпечити сталий розвиток підприємства.

Основними ризиками модернізації машинобудівних підприємств є нестача фінансових ресурсів, макроекономічна нестабільність, дефіцит кваліфікованих кадрів, високий рівень технологічних ризиків, тривалий період окупності інвестицій. Ризики та обмеження модернізаційних процесів на підприємствах наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Ризики та обмеження модернізаційних процесів на підприємствах

Вид ризику	Прояв
Фінансовий	Нестача коштів, тривала окупність
Технологічний	Невідповідність обладнання
Кадровий	Нестача фахівців
Організаційний	Опір змінам
Макроекономічний	Інфляція, нестабільність

Подолання зазначених ризиків можливе за умови комплексного підходу та узгодження дій держави, бізнесу та наукової спільноти.

Модернізація відкриває нові можливості для розвитку машинобудівної галузі України, зокрема інтеграцію у світові виробничі ланцюги, розвиток експортно-орієнтованих підприємств, підвищення технологічного рівня виробництва, створення високотехнологічних робочих місць.

Реалізація модернізаційних стратегій сприятиме зміцненню економічної безпеки держави та підвищенню її позицій на світових ринках.

Висновки

Модернізація машинобудівних підприємств України є необхідною умовою їх стійкого розвитку в сучасних умовах. Вона повинна здійснюватися на основі комплексного підходу, що поєднує технологічне оновлення, цифровізацію, інвестиційне забезпечення, розвиток людського капіталу та ефективну державну політику. Лише за таких умов машинобудівна галузь зможе стати рушієм економічного зростання та інноваційного розвитку України.

Список використаної літератури

1. Космідайло І., Марков В. Структурні трансформації та стратегічні імперативи розвитку машинобудівного комплексу України. Підприємництво та інновації, 2025. № 36. С. 99–105. <https://doi.org/10.32782/2415-3583/36.16>
2. Брюховецька Н., Черних О. Індустрія 4.0 та цифровізація економіки: можливості використання зарубіжного досвіду на промислових підприємствах України. Економіка промисловості. 2020. № 2 (90), С. 116–132. doi: 10.15407/econindustry2020.02.116
3. Целікова А. С., Мисько Є. М. Сучасний стан та проблеми розвитку машинобудівних підприємств України. Український журнал прикладної економіки та техніки. 2024. Том 9. № 2. С. 228–235. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-2-39>
4. Шитікова Л., Журило М. Effective investment in technological update – a guarantee of innovative development of the machinery building complex of Ukraine. Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Series: Economics and Management in the Oil and Gas Industry). 2025. № 1 (31). С. 190–198. [https://doi.org/10.31471/2409-0948-2025-1\(31\)-190-198](https://doi.org/10.31471/2409-0948-2025-1(31)-190-198)
5. Касич А. О. дослідження модернізаційних процесів на машинобудівних підприємствах України. Вісник ХДУ Серія Економічні науки. 2018. Том 1 № 28. С. 103–107.
6. Михальченко Г., Проценко А., Ковальов В. Основні тенденції розвитку підприємств машинобудівної галузі в умовах уповільнення інноваційних процесів. Електронне наукове фахове видання «Адаптивне управління: теорія і практика» Серія «Економіка». 2022. № 13 (26). [https://doi.org/10.33296/2707-0654-13\(26\)-07](https://doi.org/10.33296/2707-0654-13(26)-07)

References

1. Kosmidailo, I., Markov, V. (2025) Strukturni transformatsii ta strategichni imperative rozvitku mashinobudivnogo kompleksu Ukraini. Entrepreneurship and Innovation, no. 36, pp. 99–105. <https://doi.org/10.32782/2415-3583/36.16>
2. Brukhovetskaya N., Chernykh O. (2020) Industriya 4.0 I tsifrovizatsiya ekonomiki: moglivosty vikoristannya zarubijnogo dosvidu na promislivih pidpriemstvah Ukraini. Economy of Industry, no. 2 (90), pp. 116–132. <https://doi.org/10.15407/econindustry2020.02.116>
3. Tselikova A. S., Misko Ye. M. (2024) Suchasniy stan ta problemi rozvitku mashinobudivnih pidpriemstv Ukraini. Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology, no. 9(2), pp. 228–235. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-2-39>
4. Shytikova L., Zhurylo M. (2025) Effective investment in technological update as a guarantee of innovative development of the machinery-building complex of Ukraine. Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. Series: Economics and Management in the Oil and Gas Industry, no. 1(31), pp. 190–198. [https://doi.org/10.31471/2409-0948-2025-1\(31\)-190-198](https://doi.org/10.31471/2409-0948-2025-1(31)-190-198)
5. Kasych A. O. (2018) Doslidzennya modernizatsiynih protsesiv na mashinobudivnih pidpriemstvah Ukraini. Bulletin of Kherson State University. Series: Economic Sciences, no. 1(28), pp. 103–107.
6. Mykhalchenko H., Protsenko A., Kovalov V. (2022) Osnovni tendentsiy rozvitku pidpriemstv mashinobudivnoi galuzi v umovah upovilnennya innovatsiynih protsesiv. Adaptive Management: Theory and Practice. Series: Economics, no. 13(26), [https://doi.org/10.33296/2707-0654-13\(26\)-07](https://doi.org/10.33296/2707-0654-13(26)-07)

Дата першого надходження статті до видання: 12.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

О. А. БУРЛАКА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-2296-7234

О. Ю. ПРОЦЕНКО

здобувач ступеня доктора філософії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0003-1582-722X

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТРАНСПОРТУВАННЯ ТА РОЗВАНТАЖЕННЯ ЗЕРНА У ВЕРТИКАЛЬНО РОЗТАШОВАНІЙ КОВШОВІЙ НОРІЇ ЕЛЕВАТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ

Стаття присвячена пошуку та науковому обґрунтуванню шляхів удосконалення кількісних та якісних характеристик транспортування зерна різноманітних сільськогосподарських культур ковшовими вертикально змонтованими норіями з відцентровим типом розвантаження елеваторного обладнання. Такі норії набули широкого розповсюдження у складі транспортних систем елеваторного обладнання. До переваг вертикально змонтованих ковшових норій з відцентровим типом розвантаження відносять високу продуктивність транспортування зерна, (до 1000 т/година і більше) при відносно невисокій матеріалоемності, значну висоту вертикального підйому зерна (до 30 метрів і більше). Але, щодо недоліків використання таких норій: наявність прямого та зворотного сипу зерна в транспортних каналах норії; наявність механічного руйнування та компресійного пошкодження зерна робочими органами ковшевих норій; один сталий, відносно швидкості, режим транспортування зерна, що не враховує фізичні та біологічні особливості зерна, насіння різноманітних сільськогосподарських культур; збільшені витрати енергії на транспортування зерна.

Закони, закономірності та тенденції елементів технологій, технологічних процесів транспортування зерна в тому числі і за допомогою ковшових норій, представлені у наукових працях багатьох вітчизняних та закордонних вчених: Погорілий Л., Адамчук В., Гуков Я., Шейченко В. та ін.

При подальших дослідженнях встановлено, що передчасне розвантаження зерна з ковшів норії під дією відцентрової сили призводить до появи прямого та зворотного сипу зерна, збільшення ступені пошкодження зерна, додаткових затрат енергії на транспортування зерна. На повноту відцентрового розвантаження ковшової вертикально розташованої норії впливають ступінь заповнення ковша зерном, швидкість транспортування, геометричні параметри ковша, сектор розвантаження верхньої частини (головки) норії. За допомогою запропонованої математичної моделі можливо визначити або перевірити обране значення сектору розвантаження на предмет повноти відцентрового розвантаження зерна в ковшових норіях при транспортуванні різноманітних сільськогосподарських культур.

Ключові слова: зернова норія, елеваторне обладнання, ківш, відцентрове розвантаження, зерно, сільськогосподарські культури, математична модель.

О. А. BURLAKA

PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Agricultural Engineering
and Automobile Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-2296-7234

O. YU. PROTSENKO

Postgraduate Student
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0009-0003-1582-722X



IMPROVING THE QUALITY OF GRAIN TRANSPORTATION AND UNLOADING IN A VERTICALLY LOCATED BUCKET CONVEYOR OF ELEVATOR EQUIPMENT

The article is devoted to the search for and scientific justification of ways to improve the quantitative and qualitative characteristics of grain transportation of various agricultural crops using vertically mounted bucket elevators with centrifugal unloading of elevator equipment. Such elevators have become widespread in the transport systems of elevator equipment. The advantages of vertically mounted bucket elevators with centrifugal unloading include high grain transportation productivity (up to 1000 t/hour and more) with relatively low material consumption, and a significant vertical grain lift height (up to 30 meters and more). However, there are some disadvantages to using such elevators: the presence of direct and reverse grain spillage in the elevator's transport channels; mechanical destruction and compression damage to the grain by the working parts of the bucket elevators; a single constant grain transport mode in terms of speed, which does not take into account the physical and biological characteristics of grain and seeds of various agricultural crops; increased energy consumption for grain transport.

The laws, patterns and trends of the elements of technology and technological processes of grain transportation, including by means of bucket elevators, are presented in the scientific works of many domestic and foreign scientists: Pogorily L., Adamchuk V., Gukov Ya., Sheychenko V. and others.

Further research has shown that premature unloading of grain from bucket elevators under the action of centrifugal force leads to the appearance of direct and reverse grain spillage, an increase in the degree of grain damage, and additional energy costs for grain transportation. The completeness of centrifugal unloading of a vertically positioned bucket elevator is influenced by the degree of bucket filling with grain, the speed of transportation, the geometric parameters of the bucket, and the unloading sector of the upper part (head) of the elevator. Using the proposed mathematical model, it is possible to determine or verify the selected value of the unloading sector for the completeness of centrifugal unloading of grain in bucket elevators when transporting various agricultural crops.

Key words: grain elevator, elevator equipment, bucket, centrifugal unloading, grain, agricultural crops, mathematical model.

Постановка проблеми

Щодо сучасних технологій в рослинництві, то комплекси сільськогосподарських машин та обладнання в широкому діапазоні використовують транспортні системи зерна. До таких систем відносять скребкові елеватори – набули широкого розповсюдження на зернозбиральних комбайнах [2, 8] та ковшові норії – використовуються як частина транспортних систем елеваторного обладнання, зерноочисних, зерносушарних комплексах.

На виробництві до основних відмінностей скребкових елеваторів та ковшових норій, в тому числі відносять і тип розвантаження: гравітаційний, гравітаційно-відцентровий, відцентровий. В даному дослідженні акцентуємо увагу на ковшових норіях, що мають відцентровий тип розвантаження.

Такі норії набули широкого розповсюдження у складі транспортних систем елеваторного обладнання. До переваг вертикально змонтованих ковшових норій з відцентровим типом розвантаження відносять високу продуктивність транспортування зерна, (до 1000 т/година і більше) при відносно невисокій матеріалоемності, значну висоту вертикального підйому зерна (до 30 метрів і більше).

Але, щодо недоліків використання таких норій: наявність прямого та зворотного сипу зерна в транспортних каналах норії; наявність механічного руйнування та компресійного пошкодження зерна робочими органами ковшевих норій; один сталій, відносно швидкості, режим транспортування зерна, що не враховує фізичні та біологічні особливості зерна, насіння різноманітних сільськогосподарських культур; збільшені витрати енергії на транспортування зерна.

Відповідно, тема дослідження, що направлена на удосконалення технологічного процесу транспортування та відцентрового розвантаження зерна ковшовою норією є актуальною в умовах сучасного сільськогосподарського виробництва.

Також, можливо зазначити, що дослідження по удосконаленню машин і обладнання в зерновому підкомплексі аграрного сектору є невід'ємною складовою загальної стратегії гармонійного розвитку сільського господарства в Україні, що направлена на підвищення енергоефективності технологій та екологічності аграрної продукції [7, 9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Закони, закономірності та тенденції елементів технологій, технологічних процесів транспортування зерна в тому числі і за допомогою ковшових норій, представлені у наукових працях багатьох вітчизняних та закордонних вчених: Погорілий Л., Адамчук В., Гуков Я., Шейченко В. та ін. [1, 3].

Частину теоретичних питань щодо оптимізації технологічного процесу транспортування та відцентрового розвантаження зерна скребковими норіями розглянуто ту працях [6, 8, 10].

Результати складових практичної перевірки якості транспортування зерна скребковими норіями містять публікації [4, 5, 11].

Але безупинний розвиток технологій, цифровізація сільськогосподарського виробництва, розвиток механічних та електронних засобів, які надають достовірну інформацію відносно кількісних та якісних характеристик зернових потоків при транспортуванні зерна різноманітних сільськогосподарських культур технічними транспортними

системами, стратегія аграрного бізнесу, спрямована на підвищення рівня екологічності та енергоефективності продукції [7, 9], спонукає до подальших досліджень щодо удосконалення якісних та кількісних характеристик, в тому числі і ковшових норій з відцентровим типом розвантаження.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є удосконалення кількісних та якісних характеристик транспортування зерна різноманітних сільськогосподарських культур ковшовими вертикально змонтованими норіями з відцентровим типом розвантаження.

Завдання досліджень:

- застосувати складові математичної моделі руху зерна по площині внутрішньої поверхні ківшу норії для визначення закономірностей технологічних процесів відцентрового розвантаження зерна ковшових вертикально розташованих норій та оптимізації режимів роботи таких транспортних систем.
- надати практичні рекомендації щодо покращення режимів транспортування та відцентрового розвантаження зерна сільськогосподарських культур ковшовими норіями з відцентровим типом розвантаження.
- визначити стратегію подальшого наукового дослідження обраної тематики по удосконаленню кількісних та якісних характеристик транспортування зерна ковшовими вертикально розташованими норіями з відцентровим типом розвантаження.

Викладення основного матеріалу дослідження

В сучасному аграрному виробництві більшість ковшових норій, що використовуються для транспортування зерна різноманітних сільськогосподарських культур, мають відцентровий (рис. 1, а) або гравітаційний (рис. 1, б) тип розвантаження.

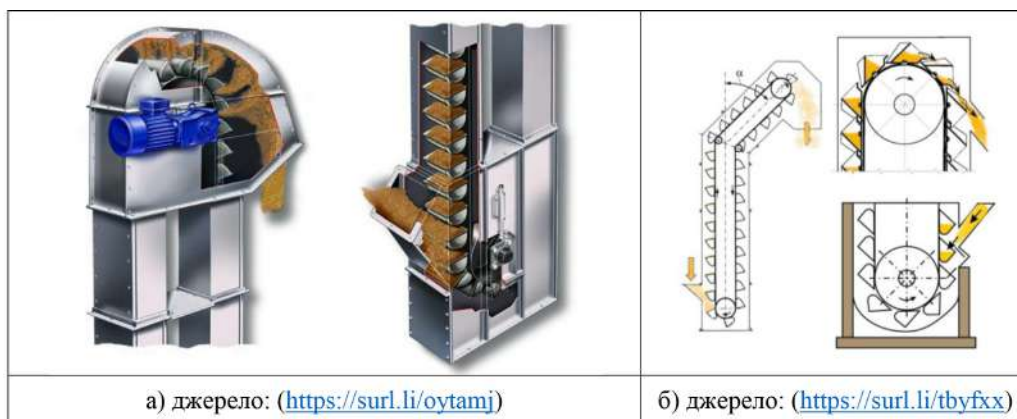


Рис. 1. Схеми ковшових норій з відцентровим (а) та гравітаційним (б) типом розвантаження зерна

В даній науковій публікації більш детально розглянемо технологічний процес розвантаження зерна в ковшовій норії типу У13-УН, що має відцентровий тип такого розвантаження.

На основі фотовідеофіксації (рис. 2) можливо чітко виокремити таке явище, як зворотний сип зерна, зумовлений специфікою сходження зернового шару з внутрішньої поверхні стінки ковша, рухом зерна під дією відцентрової сили та сили інерції від обертального руху ковша. Для віднайдення першопричин такого негативного явища розглянемо математичну модель, що описує закономірності руху зерна під час відцентрового розвантаження ковшової норії.

Передчасне розвантаження зерна з ківшів норії під дією відцентрової сили призводить до появи прямого та зворотного сипу зерна, збільшення ступені пошкодження зерна, додаткових затрат енергії на транспортування зерна (рис. 2).

Більшість сучасних норій, що використовуються для транспортування зерна, мають відцентровий тип розвантаження – так звана норія для «кидання» зерна. Такі норії є досить розповсюдженими та широко використовуються в комплексах елеваторного обладнання.

Розглянемо більш детально складові технологічного процесу транспортування та відцентрового розвантаження зерна у верхній частині норії ковшового типу з відцентровим розвантаженням.

Треба врахувати, що на повноту відцентрового розвантаження впливають ступінь заповнення ковша зерном, швидкість транспортування, геометричні параметри ковша, геометричні параметри верхньої частини (головки) норії. Продуктивність норій, наприклад виробництва «Лубнимаш» типу У13-УН може змінюватись в діапазоні від 5 до 1000 тон на годину, тому наявність навіть незначної ($\leq 1\%$) прямої чи зворотної циркуляції зерна (осипання зерна) в перерахунок на продуктивність транспортування та тривалість роботи є суттєвим недоліком в роботі такої транспортно-розвантажувальної системи.



Рис. 2. Фотовідеофіксація динаміки відцентрового розвантаження ковшової норії марки У13-УН при транспортуванні зерна кукурудзи (опрацьовано авторами на основі: <https://www.facebook.com/watch/?v=727221748017015>)

Використовуючи фотовідеофіксацію технологічного процесу відцентрового розвантаження зерна у верхній частині норії, останній можливо поділити на декілька основних етапів:

- Лінійний рух виокремленої та обмеженої геометричними розмірами ковша порції зерна;
- Проходження ковшем з зерном зони відцентрового розвантаження, при цьому поступальний рух ковша змінюється на обертальний у секторі, що дорівнює 180° . Такий сектор розвантаження умовно поділимо на дві складових по 90° . Відповідно, під час відцентрового розвантаження кожен ківш послідовно проходить спочатку першу складову кругового руху – зміна кута повороту ківшів від 0° до 90° , потім, відповідно – другу складову – зміна кута повороту ківшів від 90° до 180° .

- Важливо, при проходженні першої складової кругового руху (від 0° до 90°) умови відцентрового розвантаження спричиняють, переважно удар шарів зерна по верхній частині кожуха голівки норії, і, як наслідок – пряме та зворотне осипання зерна, додаткове механічне травмування та пошкодження зерна робочими органами норії, додаткові затрати енергії на транспортування зерна (рис. 2).

На основі вивчення геометричних форм більш поширених ковшів, що використовуються в зернових вертикально розташованих норіях в складі елеваторного обладнання (рис. 3) пропонуємо з метою усунення такого недоліку більш детально розглянути процес проходження зерна з найгіршого, за умови повноти відцентрового розвантаження, місця початкового знаходження зернини – на дні ковша (рис. 3, 4).

Обираємо додатний напрямок руху, як рух зерна по внутрішній поверхні ковша, що відхилена від нормалі до кола обертання (рис. 4, а), вгору по під дією відцентрової сили.

Рух зернини по стінці ковша (рис. 3, б, рис. 4), що складається з ламаних площин, можливо описати запропонованою математичною моделлю.



Рис. 3. Загальний вигляд ковшів, що використовуються в зернових вертикально розташованих норіях (в складі елеваторного обладнання) з криволінійною поверхнею (а) та ламаною плоскою поверхнею (б) внутрішньої нижньої стінки відносно проходження зерна при відцентровому розвантаженні (фото авторів)

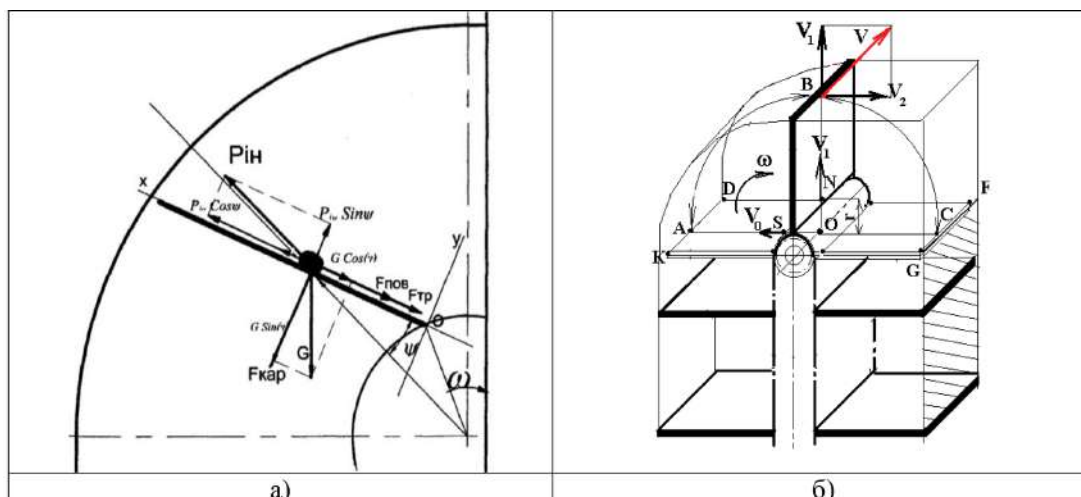


Рис. 4. Розрахункові схеми сил (а) та швидкостей (б) як модель розвантаження зерна при обертальному русі у верхній частині норії.

Джерело: удосконалено авторами як продовження власних досліджень з [6, 7, 9]

Диференційне рівняння руху у векторній формі має вигляд [6, 7, 9]:

$$m(d^2xdt^2) = P_{ин} + G + F_{кап} + F_{мп} + F_{мп1} + F_{нов}, \quad (1)$$

або:

$$m(d^2xdt^2) = m^2x - km dxdt - 2fm dxdt - [mg \cos(-t) + fmg \sin(-t)], \quad (2)$$

Загальний розв'язок диференційного рівняння набуде вигляду:

$$X_{заг} = C_1 e^{t_1} + C_2 e^{t_2} + A_1 \cos(\xi - t) + B_1 \sin(\xi - t). \quad (3)$$

Змінюючи конструктивні та технологічні характеристики зернової норії можливо обчислити розрахункові коефіцієнти C_1 та C_2 диференційного рівняння:

$$C_1 = \frac{\left((k + 2f\omega)/2 + \left(\sqrt{(k + 2f\omega)^2 + 4\omega^2} / 2 \right) \right) (-B_1 \sin \xi - A_1 \cos \xi + r)}{-\sqrt{(k + 2f\omega)^2 + 4\omega^2}} + \frac{A_1 \omega \sin \xi + B_1 \omega \cos \xi}{-\sqrt{(k + 2f\omega)^2 + 4\omega^2}}; \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{\left((k + 2f\omega)/2 - \left(\sqrt{(k + 2f\omega)^2 + 4\omega^2} / 2 \right) \right) (-B_1 \sin \xi - A_1 \cos \xi + r)}{-\sqrt{(k + 2f\omega)^2 + 4\omega^2}} - \frac{-A_1 \omega \sin \xi + B_1 \omega \cos \xi}{-\sqrt{(k + 2f\omega)^2 + 4\omega^2}}, \quad (5)$$

де $\xi = \psi + \gamma$, $\text{tg} \frac{1}{f} = \frac{\sin}{\cos}$, тобто $= \arctg \left(\frac{1}{f} \right)$.

Необхідна та мінімально достатня умова повного розвантаження зерна під дією відцентрової сили та сили, що спричиняє обертальний рух ковшів може бути визначена балансом часу проходження скребком сектору ВОС та часу руху зерна з точки О до точки В. При цьому розглядається зерно, що знаходиться у нижній частині внутрішньої поверхні ковша відносно центру обертання барабана зернової норії.

При визначенні початкових умов згідно виразів (4), (5) з урахуванням технічних та конструкційних характеристик ковшових норії і з можливістю варіацією швидкістю руху ковшів, отримуємо сукупність діаграм руху зерна по внутрішній стінці ковша під час відцентрового розвантаження за рівнянням (3) при зміні швидкості транспортування. При цьому, пропонується нами математична модель описує закономірності руху як для відцентрового, відцентрово-гравітаційного, так і для гравітаційного типу розвантаження зернової норії. Але, враховуючи діапазон швидкості транспортування зерна в сучасному елеваторному обладнанні, нижню частину діаграм можливо виокремити обмежувальними чинниками процесу транспортування та розвантаження зерна ковшовими норіями.

Також, за даною аналітикою, з урахуванням технологічної та конструкційної доцільності щодо виготовлення верхньої частини зернової ковшової норії можливо відтворити необхідну та достатню умову повного відцентрового розвантаження графічно (рис. 6). Тобто, аналітично, з використанням пропонуваної математичної моделі, можливо визначити або перевірити обране значення сектору розвантаження на предмет повноти відцентрового розвантаження зерна в ковшових норіях при транспортуванні різноманітних сільськогосподарських культур.

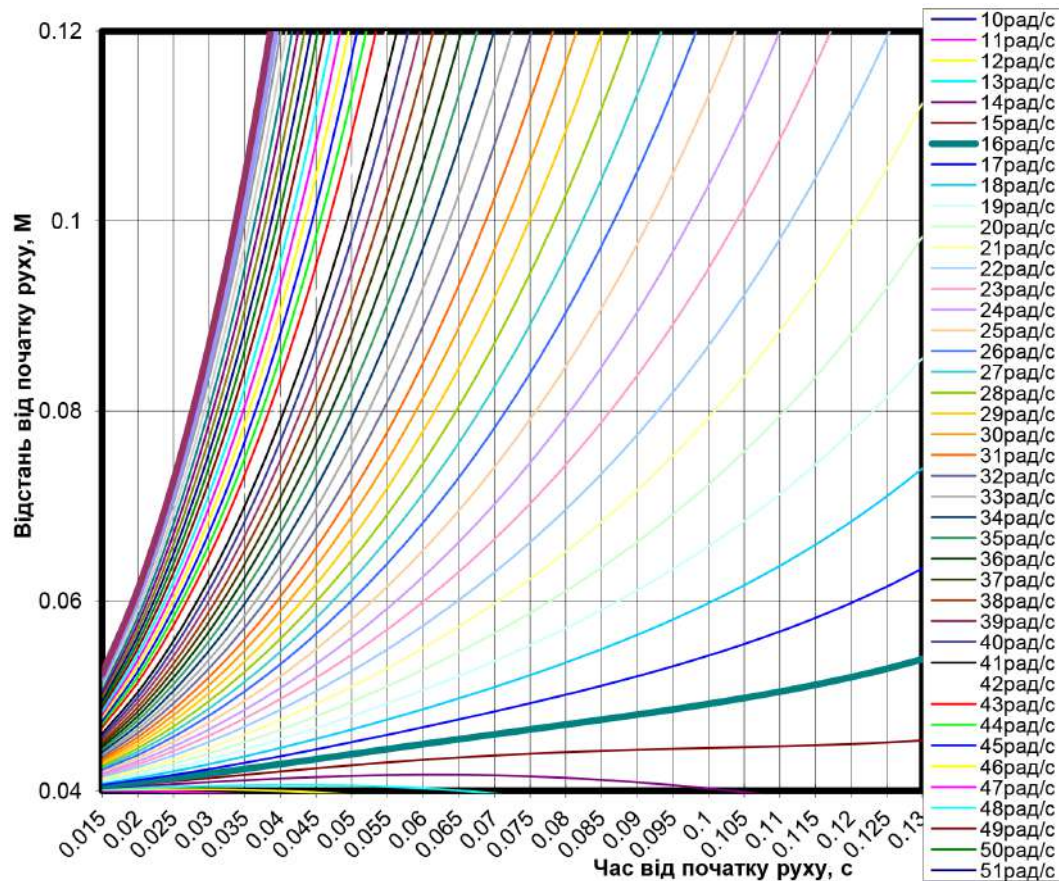


Рис. 5. Діаграма руху зерна по внутрішній стінці ковша під час відцентрового розвантаження при зміні швидкості транспортування

Джерело: розраховано авторами

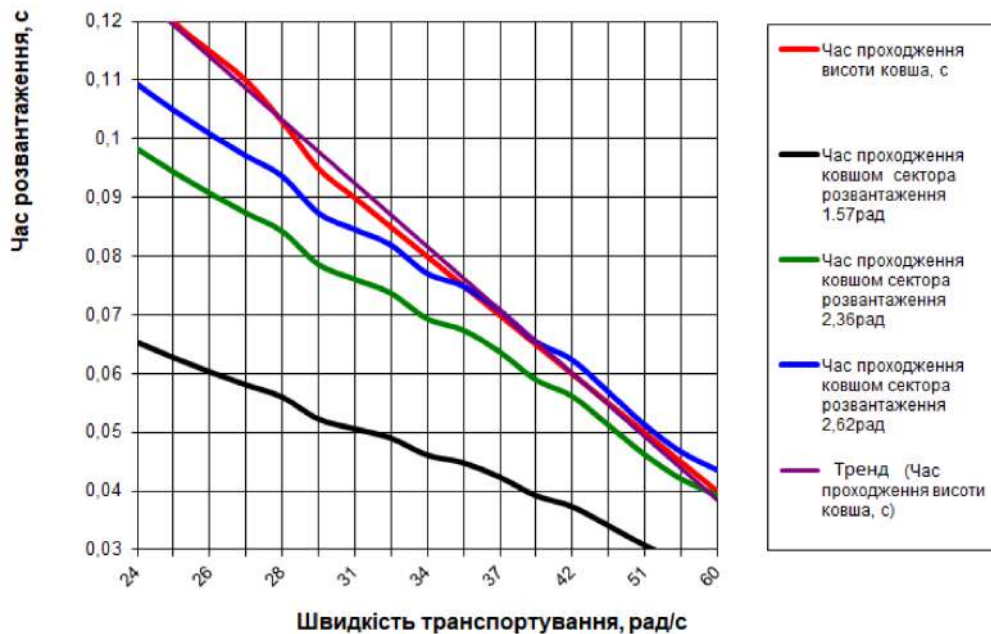


Рис. 6. Графічне відображення необхідної та достатньої умови повного відцентрового розвантаження зерна в ковшовій норії при дискретній варіації значеннями сектора розвантаження за конструкційною доцільністю (розраховано авторами)

Висновки

Передчасне розвантаження зерна з ківшів норії під дією відцентрової сили призводить до появи прямого та зворотного сипу зерна, збільшення ступені пошкодження зерна, додаткових затрат енергії на транспортування зерна.

На повноту відцентрового розвантаження ковшової вертикально розташованої норії впливають ступінь заповнення ковша зерном, швидкість транспортування, геометричні параметри ковша, сектор розвантаження верхньої частини (головки) норії. Продуктивність норій, наприклад виробництва «Лубнимаш» типу У13-УН може змінюватись в діапазоні від 5 до 1000 тон на годину, тому наявність навіть незначної ($\leq 1\%$) прямої чи зворотної циркуляції зерна (осипання зерна) в перерахунку на продуктивність транспортування та тривалість роботи є суттєвим недоліком в роботі такої транспортно-розвантажувальної системи.

За допомогою запропонованої математичної моделі можливо визначити або перевірити обране значення сектору розвантаження на предмет повноти відцентрового розвантаження зерна в ковшових норіях при транспортуванні різноманітних сільськогосподарських культур.

Список використаної літератури

1. Артёмов М. П. та ін. Технологічна блочно-варіантна система машиновикористання в землеробстві України. Частина 2. : монографія. Харків : ТОВ «Планета-Прінт», 2022. 192 с.
2. Установка для дослідження технологічних процесів елеватора комбайна: Пат. 41504 Україна : МПК (2009) A01D 41/00 № u 2008 14677; заявл. 22.12.2008; опубл. 25.05.2009, Бюл. № 10.
3. Погорілий Л., Івасюк В., Соломаха О. До практичної реалізації моніторингу ґрунтів у системі точного землеробства. *Техніка АПК*. 2002. № 10–11. С. 8–9.
4. Спосіб дослідження технологічних процесів Пат. 41557, Україна: МПК (2009) A01D 41/00 № u 2008 15248; заявл. 29.12.2008; опубл. 25.05.2009, Бюл. № 10.
5. Установка для дослідження технологічних процесів елеватора комбайна Пат. 91783 Україна: МПК(2009) A01D 61/00, A01D 93/00 №: а 2009 01515; заявл. 23.02.2009; опубл. 25.08.2010, Бюл. № 16.
6. Bilovod O., Kelemesh A., Burlaka O., Tarasenko D. Study of the features of grain transportation of various agricultural crops by scraper elevators of combine harvesters. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 2 (129). С. 98–105. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-2-12>
7. Бурлака О. А., Яхін С. В. Теоретичні аспекти процесу відцентрового розвантаження зерна у елеваторі зернозбирального комбайну. *Вісник Полтавської державної академії*. 2017. № 1–2 (84–85). С. 139–143.
8. Krajewski S., Żukovskis J., Gozdowski D., Cieśliński M., Wójcik-Gront E. Evaluating the Path to the European Commission's Organic Agriculture Goal: A Multivariate Analysis of Changes in EU Countries (2004–2021) and Socio-Economic Relationships. *Agriculture*. 2024. 14, 477. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030477>
9. Бурлака О. А., Яхін С. В. Підвищення ефективності роботи скребкових елеваторів з відцентровим типом розвантаження. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2018. № 4. С. 195–200. <https://doi.org/10.31210/visnyk2018.04.31>
10. Imelda, Hidayat R. Climate change impacts, adaptation and mitigation in the agricultural sector. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 2024. Vol. 10, Issue 3. P. 1457–1476. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.03.30>
11. Бурлака О., Яхін С., Падалка В., Бурлака А. 100 тон за годину, а що далі? Порівнюємо та аналізуємо характеристики флагманських моделей високопродуктивних зернозбиральних комбайнів. *Scientific Progress & Innovations*. 2021. (3), 274–288. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.03.34>

References

1. Artomov, M. P. ta in. (2022). *Tekhnologichna blochno-variantna systema mashynovykorystannia v zemlerobstvi Ukrainy* [Technological block-variant system of machine use in agriculture in Ukraine]. Part 2.: monograph. Kharkiv : TOV "Planeta-Print" [in Ukrainian].
2. Burlaka, O. (2009). Ustanovka dlia doslidzhennia tekhnologichnykh protsesiv elevatora kombaina [Installation for researching technological processes of a combine elevator] (Ukraine Patent No. 41504). State Department of Intellectual Property of Ukraine.
3. Pohoriliy, L., Ivasiuk, V., & Solomakha, O. (2002). Do praktychnoi realizatsii monitorynhu gruntiv u systemi tochnoho zemlerobstva [Towards the practical implementation of soil monitoring in the precision agriculture system]. *Tekhnika APK, 10–11*, 8–9 [in Ukrainian].
4. Burlaka, O. (2009). Sposib doslidzhennia tekhnologichnykh protsesiv [Method of researching technological processes] (Ukraine Patent No. 41557). State Department of Intellectual Property of Ukraine.
5. Burlaka, O. (2010). Ustanovka dlia doslidzhennia tekhnologichnykh protsesiv elevatora kombaina [Installation for researching technological processes of a combine elevator] (Ukraine Patent No. 91783). State Department of Intellectual Property of Ukraine.

6. Bilovod, O., Kelemesh, A., Burlaka, O., & Tarasenko, D. (2025). Study of the features of grain transportation of various agricultural crops by scraper elevators of combine harvesters. *Engineering, Energy, Transport AIC*, 2(129), 98–105. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-2-12>
7. Burlaka, O., & Yakhin, S. (2017). Teoretychni aspekty protsesu vidtsentrovoho rozvantazhennia zerna u elevatori zernozbyralnoho kombainu [Theoretical aspects of the process of centrifugal unloading of grain in the elevator of a combine harvester]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi akademii*, 1–2(84–85), 139–143 [in Ukrainian].
8. Krajewski, S., Żukovskis, J., Gozdowski, D., Cieśliński, M., & Wójcik-Gront, E. (2024). Evaluating the Path to the European Commission's Organic Agriculture Goal: A Multivariate Analysis of Changes in EU Countries (2004–2021) and Socio-Economic Relationships. *Agriculture*, 14, 477. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030477>
9. Burlaka, O., & Yakhin, S. (2018). Pidvyshchennia efektyvnosti roboty skrebkovykh elevatoriv z vidtsentrovym typom rozvantazhennia [Increasing the efficiency of scraper elevators with centrifugal unloading type]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi akademii*, 4, 195–200. <https://doi.org/10.31210/visnyk2018.04.31> [in Ukrainian].
10. Imelda, Hidayat, R. (2024). Climate change impacts, adaptation and mitigation in the agricultural sector. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 10(3), 1457–1476. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.03.30>
11. Burlaka, O., Yakhin, S., Padalka, V., & Burlaka, A. (2021). 100 ton za hodynu, a shcho dali? Porivniuiemo ta analizuємо kharakterystyky flahmanskykh modelei vysokoproduktyvnykh zernozbyralnykh kombainiv [100 tons per hour, what is next? Let us compares and analyzes characteristics of the latest models of highly productive combine harvesters]. *Scientific Progress & Innovations*, (3), 274–288. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.03.34> [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 20.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

В. І. ВОРОБІЙОВА

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри фізичної хімії
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-7479-9140

І. В. ГНАТКО

аспірант кафедри фізичної хімії
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0001-1348-0985

М. І. СКИБА

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технологій неорганічних речовин та екології
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0003-4634-280X

КВАНТОВО-ХІМІЧНИЙ СКРИНІНГ ГІДРОФОБНИХ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ЕВТЕКТИЧНИХ РОЗЧИННИКІВ НА ОСНОВІ МОНОТЕРПЕНОЇДІВ

У статті шляхом квантово-хімічних розрахунків в програмному середовищі HyperChem здійснено відбір 10 найбільш стійких гідрофобних низькотемпературних евтектичних розчинників на основі 6 монотерпеноїдів як обов'язкових компонентів суміші та 4 жирних кислот. Вони включали двоступеневу оптимізацію геометрії молекул речовин та визначення їх квантово-хімічних дескрипторів: електростатичного потенціалу, енергій нижчої вільної та вищої зайнятої молекулярних орбіталей, дипольного моменту. В якості розрахункових використовувались молекулярно-механічний метод ММ+ (первинна оптимізація геометрії) та напівемпіричний квантово-хімічний метод РМЗ (вторинна оптимізація геометрії, побудова ізоповерхонь, енергетичних профілів).

Для ранжування розчинників за стійкістю міжмолекулярних взаємодій було введено два кількісні критерії оцінки – K_1 та K_2 , що відповідали відповідно за електростатичну та хімічну складові утворення комплексів «акцептор водневого зв'язку – донор водневого зв'язку». За інтегральним показником $K_1 + K_2$ встановлено, що найбільш стійкими є НЕР «(±)-ментол – тимол» (1,690), «(±)-камфора – тимол» (1,686), «(+)-борнеол – тимол» (1,833), «1,8-цинеол – тимол» (1,814), «капринова кислота – тимол» (1,677), «лауринова кислота – тимол» (1,684), «міристинова кислота – тимол» (1,657), «олеїнова кислота – тимол» (1,667), «(+)-борнеол – лауринова кислота» (1,731), «1,8-цинеол – лауринова кислота» (1,712). Отримані дані корелюють з розрахованими значеннями дипольних моментів.

Результати роботи можуть бути використані для молекулярного дизайну низькотемпературних евтектичних розчинників.

Ключові слова: квантово-хімічні розрахунки, гідрофобні низькотемпературні евтектичні розчинники, монотерпеноїди, жирні кислоти, оптимізація геометрії, квантово-хімічні дескриптори, інтегральний показник, молекулярний дизайн.

V. I. VOROBYOVA

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Physical Chemistry
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0001-7479-9140



I. V. GNATKO

Postgraduate Student at the Department of Physical Chemistry
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0009-0001-1348-0985

M. I. SKIBA

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Technology of Inorganic Substances and Ecology
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0003-4634-280X

QUANTUM CHEMICAL SCREENING OF HYDROPHOBIC DEEP EUTECTIC SOLVENTS BASED ON MONOTERPENOIDS

In this article, quantum chemical calculations were performed in the HyperChem software to select the 10 most stable hydrophobic deep eutectic solvents based on 6 monoterpenoids as mandatory components of the mixture and 4 fatty acids. This involved two-stage optimization of the geometry of the molecules of the substances and determination of their quantum chemical descriptors: electrostatic potential, energies of the lowest unoccupied and highest occupied molecular orbitals, dipole moment. The MM+ molecular mechanical method (primary geometry optimization) and the PM3 semi-empirical quantum chemical method (secondary geometry optimization, construction of isosurfaces, energy profiles) were used for calculations.

To rank solvents according to the stability of intermolecular interactions, two quantitative evaluation criteria were introduced – K_1 and K_2 – corresponding to the electrostatic and chemical components of the formation of “hydrogen bond acceptor – hydrogen bond donor” complexes, respectively. Based on the integral indicator $K_1 + K_2$, it was established that the most stable deep eutectic solvents are “(±)-menthol – thymol” (1,690), “(±)-camphor – thymol” (1,686), “(+)-borneol – thymol” (1,833), “1,8-cineol – thymol” (1,814), “capric acid – thymol” (1,677), “lauric acid – thymol” (1,684), “myristic acid – thymol” (1,657), “oleic acid – thymol” (1,667), “(+)-borneol – lauric acid” (1,731), “1,8-cineole – lauric acid” (1,712). The obtained data correlates with the calculated values of dipole moments.

The results of the work can be used for molecular design of deep eutectic solvents.

Key words: quantum chemical calculations, hydrophobic deep eutectic solvents, monoterpenoids, fatty acids, geometry optimization, quantum chemical descriptors, integral index, molecular design.

Постановка проблеми

Нові тенденції розвитку «зеленої» хімії зумовлюють зростаючу зацікавленість у створенні гідрофобних низькотемпературних евтектичних розчинників (далі – НЕР) на основі сполук природного походження, зокрема монотерпеноїдів, які можуть виступати як акцепторами, так і донорами водневого зв'язку (далі – АВЗ та ДВЗ) [1]. Такі системи поєднують в собі здатність до розкладання при потрапленні в об'єкти навколишнього середовища, низьку токсичність та можливість регулювання фізико-хімічних властивостей, що робить їх потенційним кандидатом на заміну усталеним органічним неполярним розчинникам.

Сьогодні терпеноїдвмісні гідрофобні НЕР вже знайшли використання в екстракційних процесах (при вилученні важких металів з різних матриць [2], ергостерину з гриба *Agaricus Bisporus* [3], лікопіну з томатної вичавки [4], алкалоїдів гармали [5], артемізиніну з листя полину [6], карнозину та карнозинової кислоти з розмарину [7], деяких флаваноїдів), в створенні носіїв для тривалої доставки біологічно активних сполук в клітини-мішені [8], як реакційні середовища в Pd-каталізованих реакціях крос-каплінгу [9] та ряді інших сфер.

Експериментальний пошук ефективних евтектичних композицій є занадто трудомістким процесом, тому наразі все більше науковців вдаються до квантово-хімічного прогнозування їх властивостей за допомогою різноманітних програмних продуктів: HyperChem, Gaussian, Orca тощо. При вдалому підборі методу розрахунку та базису можливо врахувати усі нековалентні взаємодії і передбачити стійкість НЕР, що є найбільш важливим індикатором раціональності їх створення. Проте, обрати придатний метод розрахунку цілих комплексів вдається не завжди, тому встановлення чітких кількісних критеріїв оцінки стабільності НЕР на основі квантово-хімічних даних про самі компоненти є актуальною науковою проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В більшості з останніх наукових праць, пов'язаних з квантово-хімічним прогнозуванням властивостей гідрофобних НЕР, фігурує модель COSMO-RS. Вона базується на теорії функціональної густини (DFT) з інтеграцією специфічних дескрипторів, як-от σ -профілей та σ -поверхонь. В роботі [10] зазначається кореляція розрахованих даних з експериментальними результатами.

Підходи, що ґрунтувались виключно на молекулярній динаміці (MD) виявились нерелевантними. Зазначається, що метод можна застосовувати лише за наявності сформованої бази даних (машинне навчання) [11].

В роботі [12] за допомогою методу DFT з використанням програмного комплексу Orca було визначено енергії водневих зв'язків невеликих терпеноїдних кластерів. Для цього розглядались усі доступні активні сайти компонентів. Енергія водневого зв'язку розраховувалась як різниця між енергією оптимізованого кластера та сумою енергій оптимізованих компонентів. Топологію водневих зв'язків проаналізовано за допомогою квантової теорії Бадера.

Чимало статей присвячено передбаченню стійкості гідрофобних НЕР за допомогою аналізу наступних квантово-хімічних дескрипторів компонентів: розкиду електростатичних потенціалів, енергій граничних орбіталей, дипольного моменту, хімічної м'якості/твердості та інших споріднених. В даній роботі застосовуватиметься саме цей підхід.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є проведення з вихідного набору компонентів – монотерпеноїдів та жирних кислот – відбору 10 потенційно найбільш стабільних двокомпонентних гідрофобних НЕР, використовуючи аналіз квантово-хімічних дескрипторів, пов'язаних з електронною густиною та розподілом електронів на молекулярних орбіталях.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для проведення дослідження обрано монотерпеноїди – (±)-ментол, тимол, (±)-камфору, (+)-борнеол, (±)-ліналоол, 1,8-цинеол – та жирні кислоти – каприну, лауринову, міристинову, олеїнову. Молярне співвідношення компонентів – 1:1. Структурні формули речовин наведені на рисунку 1.

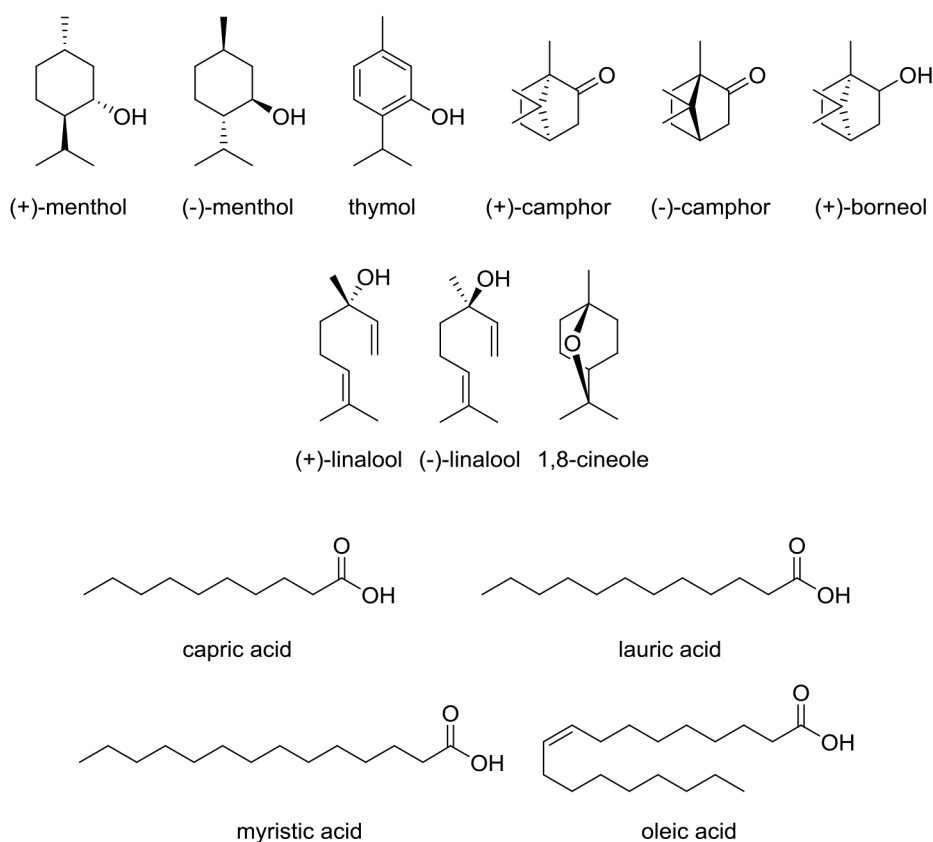


Рис. 1. Структурні формули речовин, обраних для дослідження

З переліченого набору речовин усього теоретично можна отримати двокомпонентних евтектичних систем:

$$\frac{10!}{2! \cdot (10-2)!} - \frac{4!}{2! \cdot 2!} - 1 = \frac{9 \cdot 10}{2} - \frac{3 \cdot 4}{2} - 1 = 38,$$

оскільки одним з компонентів обов'язково має бути монотерпеноїд, а система «(±)-камфора – 1,8-цинеол» не утворюватиме евтектики через відсутність в обох компонентах ковалентно зв'язаного з киснем водню. Перелік систем зведено в таблиці 1.

Оптимізація геометрії, а також визначення квантово-хімічних дескрипторів молекул речовин – граничних значень електростатичного потенціалу ($\phi_{\min, \max}$), енергій нижчої вільної та вищої зайнятої молекулярних орбіталей (E_{HOMO} , E_{LUMO}), дипольного моменту (μ) – проводились в програмному середовищі HyperChem.

Як відомо, оптичні ізомери є енергетично виродженими, тому для компонентів, що є рацемічними сумішами – (±)-ментол, (±)-камфора, (±)-ліналоол – оптимізація геометрії з подальшим обчисленням квантово-хімічних дескрипторів проводилась для одного з ізомерів.

Таблиця 1

Перелік евтектичних систем, які можна отримати з обраних речовин

№	Компоненти		№	Компоненти	
1	(±)-Ментол	Тимол	20	Тимол	Лауринова кислота
2	(±)-Ментол	(±)-Камфора	21	Тимол	Міристинова кислота
3	(±)-Ментол	(+)-Борнеол	22	Тимол	Олеїнова кислота
4	(±)-Ментол	(±)-Ліналоол	23	(±)-Камфора	Капринова кислота
5	(±)-Ментол	1,8-Цинеол	24	(±)-Камфора	Лауринова кислота
6	Тимол	(±)-Камфора	25	(±)-Камфора	Міристинова кислота
7	Тимол	(+)-Борнеол	26	(±)-Камфора	Олеїнова кислота
8	Тимол	(±)-Ліналоол	27	(+)-Борнеол	Капринова кислота
9	Тимол	1,8-Цинеол	28	(+)-Борнеол	Лауринова кислота
10	(±)-Камфора	(+)-Борнеол	29	(+)-Борнеол	Міристинова кислота
11	(±)-Камфора	(±)-Ліналоол	30	(+)-Борнеол	Олеїнова кислота
12	(+)-Борнеол	(±)-Ліналоол	31	(±)-Ліналоол	Капринова кислота
13	(+)-Борнеол	1,8-Цинеол	32	(±)-Ліналоол	Лауринова кислота
14	(±)-Ліналоол	1,8-Цинеол	33	(±)-Ліналоол	Міристинова кислота
15	(±)-Ментол	Капринова кислота	34	(±)-Ліналоол	Олеїнова кислота
16	(±)-Ментол	Лауринова кислота	35	1,8-Цинеол	Капринова кислота
17	(±)-Ментол	Міристинова кислота	36	1,8-Цинеол	Лауринова кислота
18	(±)-Ментол	Олеїнова кислота	37	1,8-Цинеол	Міристинова кислота
19	Тимол	Капринова кислота	38	1,8-Цинеол	Олеїнова кислота

В першому наближенні пошук конформації молекул з мінімальною потенціальною енергією здійснювався з використанням молекулярно-механічного підходу; для кінцевої оптимізації геометрії обрано напівемпіричний квантово-хімічний метод РМЗ, оскільки, як правило, він краще за інші описує взаємодії в органічних молекулах, що не містять атомів перехідних металів. В таблиці 2 зазначено умови, в яких проводилась оптимізація геометрії.

Таблиця 2

Задані умови оптимізації геометрії

Оптимізація	Умови оптимізації
Первинна	Метод розрахунку молекулярних потенціалів – ньютонівський (молекулярна механіка) Силове поле – ММ + Алгоритм оптимізації – за Полаком-Ріб'єром Гradient середньоквадратичного відхилення енергій двох останніх розрахованих структур (RMS gradient) – 0,01 ккал/(Å × моль)
Вторинна	Метод розрахунку молекулярних потенціалів – напівемпіричний квантово-хімічний (РМЗ) Алгоритм оптимізації – за Полаком-Ріб'єром Gradient середньоквадратичного відхилення енергій двох останніх розрахованих структур (RMS gradient) – 0,01 ккал/(Å × моль)

Розрахунок квантово-хімічних дескрипторів реалізовано за допомогою вже згаданого напівемпіричного методу РМЗ. Для знаходження граничних значень електростатичного потенціалу було побудовано тривимірні ізоповерхні молекул, а для знаходження енергій НВМО та ВЗМО – енергетичний профіль молекулярних орбіталей.

В таблицях 3 і 4 наведено відповідно оптимізовані геометрії та визначені квантово-хімічні дескриптори молекул речовин, які були відібрані для проведення скринінгу. Надлишковий позитивний заряд зосереджено на атомі водню ДВЗ, який знаходиться безпосередньо біля атома кисню, а надлишковий негативний заряд – на атомі кисню АВЗ. Отже, на основі даних про електростатичні потенціали можна однозначно визначити роль компонента в суміші, достатньо порівняти мінімуми та максимуми потенціалу.

Для оцінки стійкості міжмолекулярних взаємодій в димерах «АВЗ – ДВЗ» введено два показники:

$$K_1 = \frac{\varphi_{\max}(\text{ДВЗ}) - \varphi_{\min}(\text{АВЗ})}{\Delta\varphi_{\max}}, \quad (1)$$

де $\varphi_{\max}(\text{ДВЗ})$ – максимальне значення електростатичного потенціалу ДВЗ, e/a_0 ;

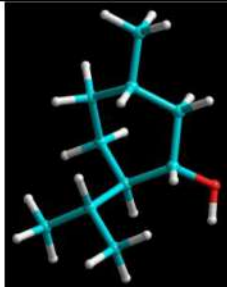
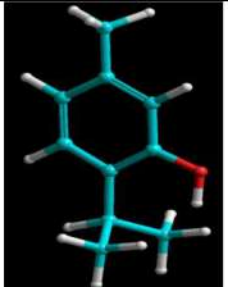
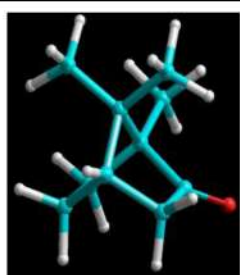
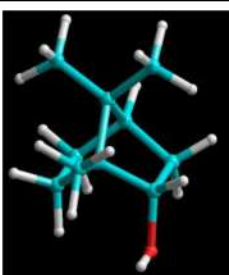
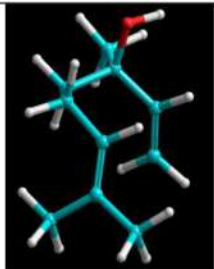
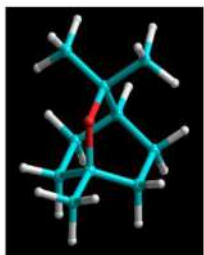
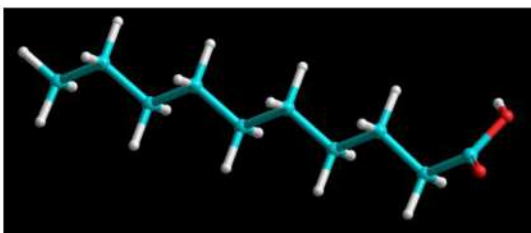
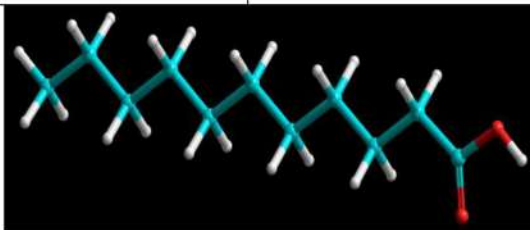
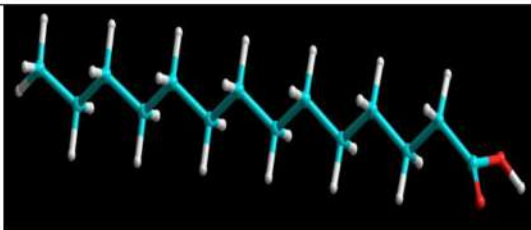
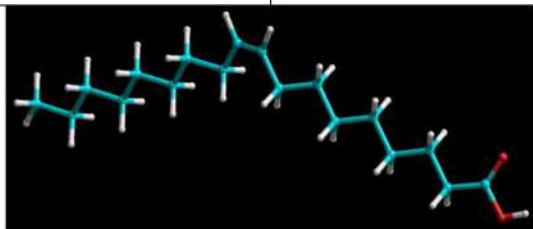
$\varphi_{\min}(\text{АВЗ})$ – мінімальне значення електростатичного потенціалу АВЗ, e/a_0 ;

$\Delta\varphi_{\max}$ – максимальна різниця електростатичних потенціалів в ряду, e/a_0 .

$$K_2 = \frac{E_{\text{НВМО}}(\text{АВЗ}) - E_{\text{ВЗМО}}(\text{ДВЗ})}{\Delta E_{\max}}, \quad (2)$$

Таблиця 3

Геометрично оптимізовані молекули речовин, відібрані для проведення скринінгу

			
(+)-Ментол	Тимол	(-)-Камфора	(+)-Борнеол
			
(-)-Ліналоол	1,8-Цинеол	Капринова кислота	
			
Лауринова кислота		Міристинова кислота	
			
Олеїнова кислота			

де $E_{HВМО} (AB3)$ – енергія $HВМО$ $AB3$, еВ;

$E_{ВЗМО} (ДВ3)$ – енергія $ВЗМО$ $ДВ3$, еВ;

ΔE_{max} – максимальна різниця енергій граничних підрівнів в ряду, еВ.

Результати оцінки наведені в таблиці 5. Встановлено, що 10 найбільш стабільними НЕР є системи № 1, № 6, № 7, № 9, № 19–22, № 28 та № 36. Варто відмітити, що до переліку увійшли усі системи «тимол – жирна кислота»: це пов'язано зі спряженням неподіленої пари електронів атома кисню тимолу з бензеновим кільцем, через що надлишковий позитивний заряд водню набуває доволі високих значень, і, звідси, проявом хороших акцепторних властивостей карбоксильних груп. Порівняння дипольних моментів речовин підтверджує отримані розрахункові дані.

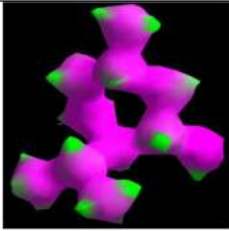
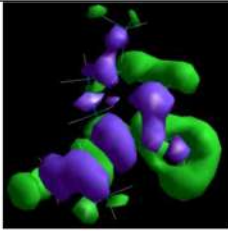
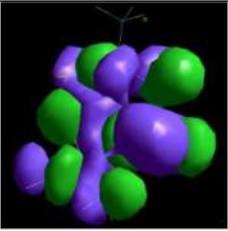
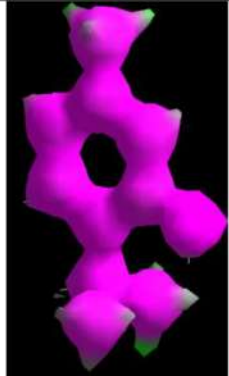
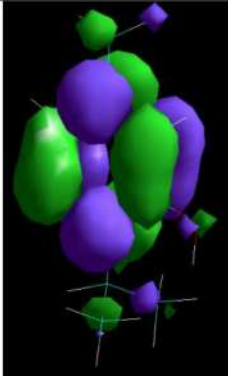
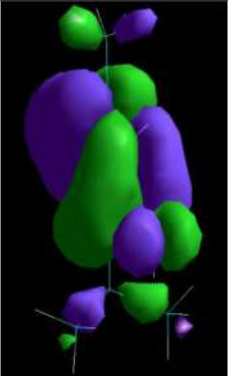
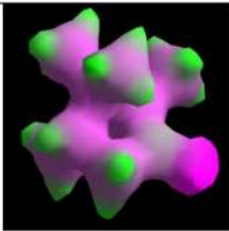
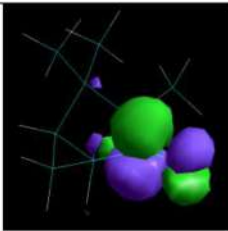
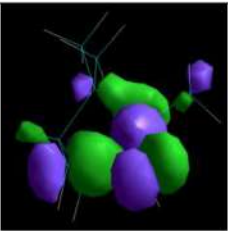
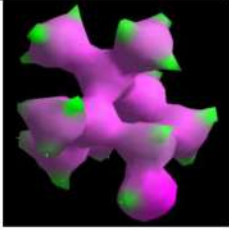
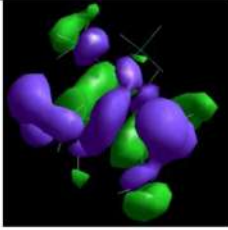
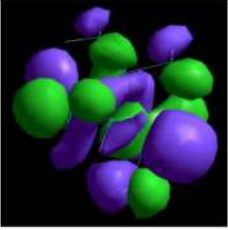
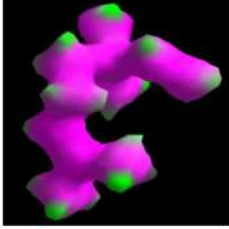
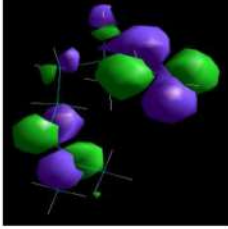
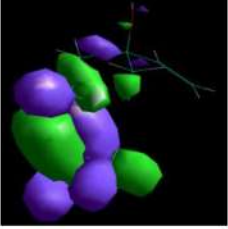
Висновки

Здійснено відбір гідрофобних НЕР на основі монотерпеноїдів із застосуванням молекулярно-механічного (ММ+) та напівемпіричного квантово-хімічного (РМ3) методів у програмному середовищі HyperChem:

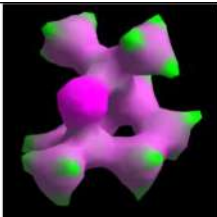
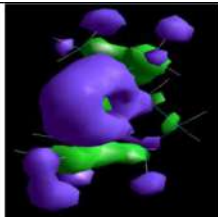
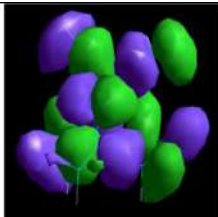
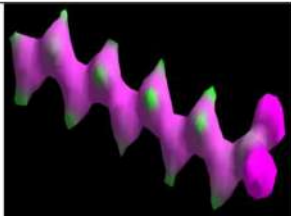
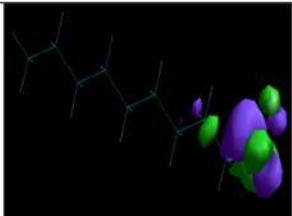
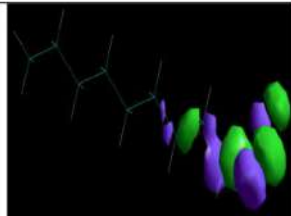
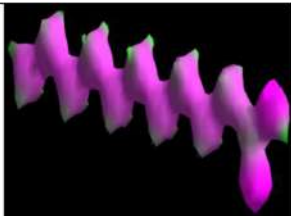
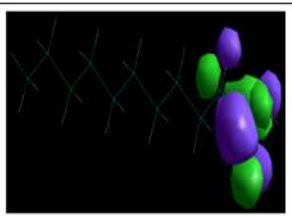
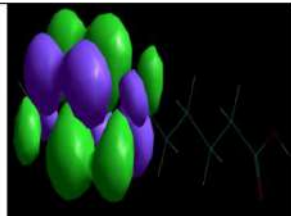
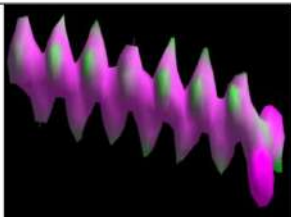
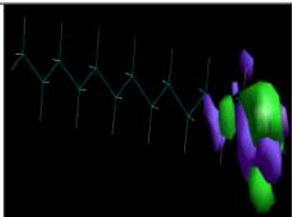
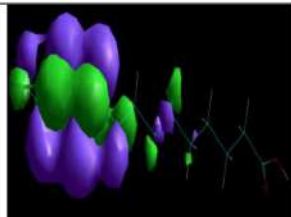
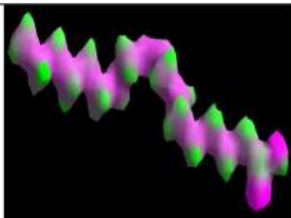
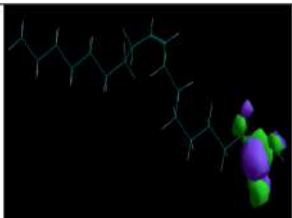
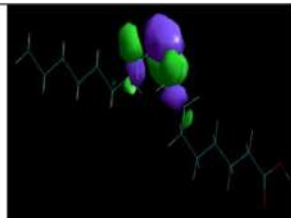
1. Проведено доступену оптимізацію геометрії компонентів та визначено їх найбільш важливі квантово-хімічні дескриптори – граничні значення електростатичного потенціалу, енергії $HВМО$ та $ВЗМО$, а також дипольні моменти.

Таблиця 4

Значення квантово-хімічних дескрипторів молекул речовин, відібраних для проведення скринінгу

Молекула	$\varphi_{\min, \max}, e/a_0$	ЕНВМО, еВ	ЕВЗМО, еВ	μ , Дебай
(+)-Ментол	 $\varphi_{\min} = 0,273; \varphi_{\max} = 1,212$	 3,068	 -10,626	1,513
Тимол	 $\varphi_{\min} = 0,318; \varphi_{\max} = 2,566$	 0,281	 -8,974	1,221
(-)-Камфора	 $\varphi_{\min} = -0,111; \varphi_{\max} = 0,883$	 0,941	 -10,257	2,692
(+)-Борнеол	 $\varphi_{\min} = -0,102; \varphi_{\max} = 1,608$	 3,114	 -10,547	1,490
(-)-Ліналоол	 $\varphi_{\min} = 0,180; \varphi_{\max} = 1,060$	 0,940	 -9,458	1,687

Закінчення табл. 4

1,8-Цинеол	 $\varphi_{\min} = -0,101; \varphi_{\max} = 1,286$	 2,847	 -10,380	1,347
Капринова кислота	 $\varphi_{\min} = -0,069; \varphi_{\max} = 1,575$	 1,030	 -11,158	4,363
Лауринова кислота	 $\varphi_{\min} = -0,101; \varphi_{\max} = 1,854$	 0,962	 -11,337	1,801
Міристинова кислота	 $\varphi_{\min} = -0,035; \varphi_{\max} = 1,036$	 0,933	 -11,316	1,899
Олеїнова кислота	 $\varphi_{\min} = -0,055; \varphi_{\max} = 0,633$	 0,962	 -9,825	1,773

2. Запропоновано два кількісні критерії оцінки стійкості комплексів «АВЗ – ДВЗ», що базуються на відношеннях різниці електростатичних потенціалів та енергій граничних молекулярних орбіталей до відповідних значень-лідерів ряду. Сумарний показник використано в якості інтегральної міри стійкості міжмолекулярних зв'язків в комплексах. Такий підхід дозволив ранжувати 38 теоретично можливих систем і відібрати 10 найбільш перспективних. Встановлено, що найвищу прогнозовану стабільність мають системи «(±)-ментол – тимол», «(±)-камфора – тимол», «(+)-борнеол – тимол», «1,8-цинеол – тимол», «капринова кислота – тимол», «лауринова кислота – тимол», «міристинова кислота – тимол», «олеїнова кислота – тимол», «(+)-борнеол – лауринова кислота», «1,8-цинеол – лауринова кислота». Узгодженість отриманих результатів із величинами дипольних моментів додатково підтверджує коректність розрахунків.

Дослідження виконано в рамках гранту НФДУ «Передова наука в Україні 2026-2028» [грант № 2025.07/0078].

Таблиця 5

Результати оцінки стійкості міжмолекулярних взаємодій в комплексах «AB3 – ДВ3»

№	AB3	ДВ3	$\Delta\varphi, e/a_0$	K_1	$\Delta E, eB$	K_2	$K_1 + K_2$
1	(±)-Ментол	Тимол	2,293	0,857	12,042	0,833	1,690
2	(±)-Камфора	(±)-Ментол	1,323	0,494	11,567	0,800	1,295
3	(+)-Борнеол	(±)-Ментол	1,314	0,491	13,740	0,951	1,442
4	(±)-Ліналоол	(±)-Ментол	1,032	0,386	11,566	0,800	1,186
5	1,8-Цинеол	(±)-Ментол	1,313	0,490	13,473	0,932	1,423
6	(±)-Камфора	Тимол	2,677	1,000	9,915	0,686	1,686
7	(+)-Борнеол	Тимол	2,668	0,997	12,088	0,836	1,833
8	(±)-Ліналоол	Тимол	2,386	0,891	9,914	0,686	1,577
9	1,8-Цинеол	Тимол	2,667	0,996	11,821	0,818	1,814
10	(±)-Камфора	(+)-Борнеол	1,719	0,642	11,488	0,795	1,437
11	(±)-Камфора	(±)-Ліналоол	1,171	0,437	10,399	0,720	1,157
12	(+)-Борнеол	(±)-Ліналоол	1,162	0,434	12,572	0,870	1,304
13	1,8-Цинеол	(+)-Борнеол	1,709	0,638	13,394	0,927	1,565
14	1,8-Цинеол	(±)-Ліналоол	1,161	0,434	6,611	0,457	0,891
15	Капринова кислота	(±)-Ментол	1,281	0,479	9,596	0,664	1,143
16	Лауринова кислота	(±)-Ментол	1,313	0,490	9,664	0,669	1,159
17	Міристинова кислота	(±)-Ментол	1,247	0,466	9,693	0,671	1,137
18	Олеїнова кислота	(±)-Ментол	1,267	0,473	9,664	0,669	1,142
19	Капринова кислота	Тимол	2,635	0,984	10,004	0,692	1,677
20	Лауринова кислота	Тимол	2,667	0,996	9,936	0,688	1,684
21	Міристинова кислота	Тимол	2,601	0,972	9,907	0,686	1,657
22	Олеїнова кислота	Тимол	2,621	0,979	9,936	0,688	1,667
23	(±)-Камфора	Капринова кислота	1,686	0,630	12,099	0,837	1,467
24	(±)-Камфора	Лауринова кислота	1,965	0,734	12,278	0,850	1,584
25	(±)-Камфора	Міристинова кислота	1,147	0,428	12,257	0,848	1,277
26	(±)-Камфора	Олеїнова кислота	0,744	0,278	10,766	0,745	1,023
27	(+)-Борнеол	Капринова кислота	1,677	0,626	14,272	0,988	1,614
28	(+)-Борнеол	Лауринова кислота	1,956	0,731	14,451	1,000	1,731
29	(+)-Борнеол	Міристинова кислота	1,138	0,425	14,430	0,999	1,424
30	(+)-Борнеол	Олеїнова кислота	0,735	0,275	12,939	0,895	1,170
31	Капринова кислота	(±)-Ліналоол	1,129	0,422	10,488	0,726	1,148
32	Лауринова кислота	(±)-Ліналоол	1,161	0,434	10,420	0,721	1,155
33	Міристинова кислота	(±)-Ліналоол	1,095	0,409	10,391	0,719	1,128
34	Олеїнова кислота	(±)-Ліналоол	1,115	0,417	10,420	0,721	1,138
35	1,8-Цинеол	Капринова кислота	1,676	0,626	14,005	0,969	1,595
36	1,8-Цинеол	Лауринова кислота	1,955	0,730	14,184	0,982	1,712
37	1,8-Цинеол	Міристинова кислота	1,137	0,425	14,163	0,980	1,405
38	1,8-Цинеол	Олеїнова кислота	0,734	0,274	12,672	0,877	1,151

Список використаної літератури

1. M. Devi et al. Hydrophobic deep eutectic solvents as greener substitutes for conventional extraction media: examples and techniques, *ACS. Omega*. 2023. Vol. 8, № 11. P. 9702–9728.
2. D. J. Van Osch et al. A search for natural hydrophobic deep eutectic solvents based on natural components. *ACS. Sustain. Chem. Eng.* 2019. Vol. 7, № 3. P. 2933–2942.
3. Khare, L., Karve, T., Jain, R., Dandekar, P. Menthol based hydrophobic deep eutectic solvent for extraction and purification of ergosterol using response surface methodology. *Food Chem.* 2021. Vol. 340. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127979 (date of access: 12.02.2026).
4. Silva, Y. P. A., Ferreira, T. A. P. C., Jiao, G., Brooks, M. S. Sustainable approach for lycopene extraction from tomato processing by-product using hydrophobic eutectic solvents. *J. Food Sci. Technol.* 2019. Vol. 56. P. 1649–1654.
5. Tomáš Křížek et al. Menthol-based hydrophobic deep eutectic solvents: Towards greener and efficient extraction of phytocannabinoids. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 193, № 20. P. 391–396.
6. Briars, R., Paniwnyk, L. Effect of ultrasound on the extraction of artemisinin from *Artemisia annua*. *Industrial Crops and Products*. 2013. Vol. 42. P. 595–600. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.06.043 (date of access: 12.02.2026).
7. José Pedro Wojeicichowski et al. Using COSMO-RS in the Design of Deep Eutectic Solvents for the Extraction of Antioxidants from Rosemary. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2020. Vol. 8, № 32. P. 12132–12141.

8. I. M. Aroso et al. Design of controlled release systems for THEDES – Therapeutic deep eutectic solvents, using supercritical fluid technology. *Int. J. Pharm.* 2015. Vol. 492, № 1–2. P. 73–79.
9. Mahsa Niakan, Majid Masteri-Farahani, Hemayat Shekaari, Sabah Karimi. Pd supported on clicked cellulose-modified magnetite-graphene oxide nanocomposite for C-C coupling reactions in deep eutectic solvent. *Carbohydrate Polymers*. 2021. Vol. 251. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117109 (date of access: 12.02.2026).
10. Thomas Quaid, Toufiq Reza. COSMO-RS predictive screening of type 5 hydrophobic deep eutectic solvents for selective platform chemicals absorption. *Journal of Molecular Liquids*. 2023. Vol. 382. DOI: 10.1016/j.molliq.2023.121918 (date of access: 12.02.2026).
11. B. Bernicot, G. Arrachart, S. Dourdain, N. Schaeffer, G. Teixeira, S. Pellet-Rostaing. Design and characterization of novel hydrophobic eutectic solvents based on metal-extracting ligands. *Journal of Molecular Liquids*. 2025. Vol. 427. DOI: 10.1016/j.molliq.2025.127332 (date of access: 12.02.2026).
12. Sara Rozas, Lorena Zamora, Cristina Benito, Mert Atilhan. A study on monoterpenoid-based natural deep eutectic solvents. *Green Chemical Engineering*. 2023. Vol. 4. P. 99–114. DOI: 10.1016/j.gce.2022.05.005 (date of access: 12.02.2026).

References

1. Devi, M et al. (2023). Hydrophobic deep eutectic solvents as greener substitutes for conventional extraction media: examples and techniques. *ACS Omega*, 8(11), 9702–9728.
2. D. J. Van Osch, et al. (2019). A search for natural hydrophobic deep eutectic solvents based on natural components. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(3), 2933–2942.
3. Khare, L., Karve, T., Jain, R., Dandekar, P. (2021). Menthol based hydrophobic deep eutectic solvent for extraction and purification of ergosterol using response surface methodology. *Food Chemistry*, 340. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127979 (date of access: 12.02.2026).
4. Silva, Y. P. A., Ferreira, T. A. P. C., Jiao, G., Brooks, M. S. (2019). Sustainable approach for lycopene extraction from tomato processing by-product using hydrophobic eutectic solvents. *Journal of Food Science and Technology*, 56(3), 1649–1654.
5. Tomáš Křížek et al. (2018). Menthol-based hydrophobic deep eutectic solvents: Towards greener and efficient extraction of phytocannabinoids. *Journal of Cleaner Production*, 193(20), 391–396.
6. Briars, R., Paniwnyk, L. (2013). Effect of ultrasound on the extraction of artemisinin from *Artemisia annua*. *Industrial Crops and Products*, 42, 595–600. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.06.043 (date of access: 12.02.2026).
7. José Pedro Wojciechowski et al. (2020). Using COSMO-RS in the design of deep eutectic solvents for the extraction of antioxidants from rosemary. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(32), 12132–12141.
8. I. M. Aroso et al. (2015). Design of controlled release systems for THEDES – Therapeutic deep eutectic solvents, using supercritical fluid technology. *International Journal of Pharmaceutics*, 492(1–2), 73–79.
9. Mahsa Niakan, Majid Masteri-Farahani, Hemayat Shekaari, Sabah Karimi. (2021). Pd supported on clicked cellulose-modified magnetite-graphene oxide nanocomposite for C-C coupling reactions in deep eutectic solvent. *Carbohydrate Polymers*, 251. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117109 (date of access: 12.02.2026).
10. Thomas Quaid, Toufiq Reza. (2023). COSMO-RS predictive screening of type 5 hydrophobic deep eutectic solvents for selective platform chemicals absorption. *Journal of Molecular Liquids*, 382. DOI: 10.1016/j.molliq.2023.121918 (date of access: 12.02.2026).
11. B. Bernicot, G. Arrachart, S. Dourdain, N. Schaeffer, G. Teixeira, S. Pellet-Rostaing. (2025). Design and characterization of novel hydrophobic eutectic solvents based on metal-extracting ligands. *Journal of Molecular Liquids*, 427. DOI: 10.1016/j.molliq.2025.127332 (date of access: 12.02.2026).
12. Sara Rozas, Lorena Zamora, Cristina Benito, Mert Atilhan. (2023). A study on monoterpenoid-based natural deep eutectic solvents. *Green Chemical Engineering*, 4(1), 99–114. DOI: 10.1016/j.gce.2022.05.005 (date of access: 12.02.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 16.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

Д. О. ДМИТРІЄВ

професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8200-351X

А. М. КИРИЧЕНКО

професор кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Центральноукраїнський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-4335-9588

М. Ф. КУЗМІЧОВ

аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0003-1501-6865

ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ СМАРТПРОМИСЛОВОСТІ В МАШИНОБУДІВНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ І ІНЖЕНЕРНІЙ ОСВІТІ

У статті проведено теоретичні дослідження модельного інструментарію, що застосовується в інженерії та підготовці фахівців у вигляді програмних комплексів для опису в промисловому машинобудівному комплексі сучасних технологічних процесів як цифрових двійників. Наведено аналіз імітаційної моделі окремої технологічної ділянки реального Українського підприємства з виробництва дерев'яних вікон, за допомогою системи Product Lifecycle Management Tecnomatix Plant Simulation, проаналізовано останні дослідження що застосовують дане програмне забезпечення. Запропоновано заходи для модернізації підприємства, у вигляді, структурної перебудови логістичних процесів в технологічній ділянці та впровадження на окремих операціях верстатів з числовим програмним керуванням замість існуючого обладнання на підприємстві. В результаті параметричного аналізу роботи модернізованої технологічної лінії визначено технічні заходи для підвищення ефективності роботи виробництва.

Детально розглянуто вплив даних про завантаженість верстатів на основі їх технічних характеристик та виконано порівняльний аналіз ключових показників ефективності за стандартом ISO 22400. Зокрема виконано оцінку коефіцієнту браку після структурних і логістичних перебудов віртуальної технологічної лінії виробництва дерев'яних вікон. В результаті імітаційного моделювання отримано значущу кількість статистично оброблених показань віртуальних датчиків, для створення можливості побудови і додавання до архітектури моделі цифрових двійників промислового комплексу неймережевих моделей. Зроблено технічні пропозиції на рівні модельних рішень та візуалізовано роботу технологічної ділянки для симуляцій, оцінки і прийняття інженерних рішень для застосування в Product Lifecycle Management системі Tecnomatix Plant Simulation. Окремі отримані дані імітаційного моделювання виробничих процесів, послідовність процедур моделювання, прийоми оцінки та візуалізації прийнято для застосування у підготовці фахівців магістерської освітньої програми «Смартпромисловість» Херсонського національного технічного університету та бакалаврської освітньої програми «Інжиніринг технологій, мехатроніка та 3D друк» в Центральноукраїнському національному технічному університеті в рамках спеціальності G9 «Прикладна механіка».

Ключові слова: цифрові двійники, моделювання, ключові показники ефективності, коефіцієнт браку, виробництво.

D. O. DMYTRIIEV

Professor at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8200-351X

A. M. KYRYCHENKO

Professor at the Department of Mechanical Engineering, Mechatronics and Robotics
Central Ukrainian National Technical University
ORCID: 0000-0002-4335-9588



M. F. KUZMICHOV

Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics

Kherson National Technical University

ORCID: 0009-0003-1501-6865

TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN THE COMPONENT DESIGN OF METAL ALLOY 3D-PRINTING EQUIPMENT

The article presents theoretical research on model-based tools used in engineering practice and specialist training in the form of software systems for describing modern technological processes in the industrial machine-building sector as digital twins. An analysis of a simulation model of a specific technological section of a real Ukrainian enterprise engaged in the production of wooden windows is conducted using the Product Lifecycle Management (PLM) system Tecnomatix Plant Simulation, along with a review of recent studies applying this software.

Measures for enterprise modernization are proposed, including structural reorganization of logistics processes within the technological section and the implementation of computer numerical control (CNC) machines for selected operations to replace existing equipment. As a result of a parametric analysis of the operation of the modernized technological line, technical measures aimed at improving production efficiency are identified.

The impact of machine utilization data based on technical characteristics is analyzed in detail, and a comparative analysis of key performance indicators in accordance with the ISO 22400 standard is performed. In particular, the defect rate coefficient after structural and logistical reconfiguration of the virtual technological line for wooden window production is evaluated. Simulation modeling produced a significant amount of statistically processed virtual sensor data, enabling the development and integration of neural network models into the digital twin architecture of the industrial system.

Technical proposals at the level of model-based solutions are formulated, and the operation of the technological section is visualized to support simulation, evaluation, and engineering decision-making within the PLM system Tecnomatix Plant Simulation. Selected results of simulation modeling of production processes, the sequence of modeling procedures, as well as methods for evaluation and visualization are adopted for use in the training of specialists within the master's educational program "Smart Industry" at Kherson National Technical University and the bachelor's educational program "Engineering Technologies, Mechatronics, and 3D Printing" at Central Ukrainian National Technical University under the specialty G9 "Applied Mechanics."

Key words: digital twins, simulation, key performance indicators, defect rate, manufacturing.

Постановка проблеми

Сучасна промисловість вже широко використовує науково і практично обумовлені передумови для тісної інтеграції з інструментами CAD/CAM/CAE однак це потребує достовірних даних для моделювання та оптимізації виробничих процесів, тому суттєвим потенціалом здатним надати проривний розвиток машинобудівній галузі є можливість побудови цифрових двійників технологічного, верстатного і роботизованого обладнання, що входять до технологічних та промислових комплексів на всіх ієрархічних рівнях виробничих систем. Такі дослідження узгоджуються з національними пріоритетами цифрового розвитку, інноваційної діяльності та промислової модернізації як ключовий елемент цифрової трансформації машинобудування, що визначено: Розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1467-р від 17.11.2021 р. «Про схвалення Стратегії здійснення цифрового розвитку на період до 2030 року» (стратегічні напрями цифровізації промисловості, запровадження інтелектуальних виробничих систем і підвищення ефективності управління на основі даних); Постановою КМУ № 1317 від 01.12.2023 р. «Деякі питання цифровізації діяльності державних органів» (вимоги до цифрової інфраструктури, інтероперабельності та захисту даних, що безпосередньо враховується під час розроблення архітектури цифрових двійників промислових систем); Стратегією цифрового розвитку та інновацій «WINWIN 2030», затвердженою Урядом України у 2025 р. (розробка цифрових двійників машинобудівних підприємств є складовою розвитку штучного інтелекту та індустріальної аналітики як створення національних технологічних центрів досконалості). Цифрові двійники у інженерному моделюванні традиційно містять CAD/CAE-модель, що постійно отримує дані від сенсорів (наприклад, температурних, тензометричних тощо) та оновлює свій стан. Така інтеграція дозволяє не лише відображати поточний стан системи, а й прогнозувати майбутні зміни, аналізувати «що-якщо» сценарії та тестувати різні режими роботи без ризику для обладнання. Тому одним і досить впливовим аспектом смартизації машинобудування полягатиме у створенні віртуального відображення фізичних процесів як «цифрового двійника» (Digital Twin) на підприємстві з можливістю аналізу, оптимізації та прогнозування подій включаючи моделювання виробничих систем як процес використання спеціального комплексу програмного забезпечення для створення комп'ютерних абстракцій реальних виробничих процесів з метою їх аналізу та отримання важливих даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Створення цифрових двійників саме в машинобудівній галузі ускладнюється наявністю не лише інформаційних потоків, а і явищ фізична сутність яких вимагає специфічних міждисциплінарних досліджень з різних феноменологічних і методологічних напрямів таких як процеси автоматизованого проектування, процеси різання

і механічної обробки, інженерія поверхні і трибологія, теорія автоматизованого управління, віртуальна і доповнена реальність і ін. [5]. На сьогодні дану потребу можна забезпечити виключно дотримуючись розвитку машинобудівних технологій згідно принципів Industry 4.0/5.0 [1–4].

Поняття, сутність і тенденції розвитку цифрових двійників в сфері машинобудування висвітлено в роботах [7; 8]. Ідея створення і перспективність використання цифрових двійників металорізальних верстатів висвітлена в роботах [6, 7]. Виокремлення недосліджених частин загальної проблеми доводиться тим, що попри достатню кількість праць, присвячених розробкам цифрових двійників в техніці, робот, у яких було б акцентовано увагу на розробці їх в технологічних процесах машинобудування дуже мало [8, 9]. В закордонних працях переважно приділено увагу здебільшого проблемам та питанням перспективності створення цифрових двійників технологічних систем загалом. Роботи українських вчених, в яких би висвітлювалася концепція створення цифрових двійників тільки починаються [10]. Пропонується застосувати інструменти модельно-орієнтованого системного інжинірингу.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є розробка підходів і виокремлення сфер застосування в інженерії та підготовці фахівців, включаючи вищу світу програмних комплексів здатних адаптовано описати в промисловому машинобудівному комплексі сучасні технологічні процеси як цифрові двійники, застосовуючи мультифізичне моделювання, де враховуються як різні технологічні процеси, їх взаємний вплив та структурна оптимізація машинобудівного виробництва на рівні встановлених стандартами ключових показників ефективності.

Викладення основного матеріалу дослідження

Україна прагне до стандартів ЄС включаючи машинобудівне виробництво, де принципи Industry 4.0 є стратегічними для розвинених в промисловому і соціальному плані країн. Машинобудівне виробництво за Європейськими стандартами тісно пов'язане з інтелектуалізацією соціуму, розвитком STEM освіти, та високих стандартів життя людини її безпекового середовища, відповідність умовам сталого розвитку суспільства. Машинобудування є серцевиною реального сектору економіки із значною зайнятістю населення, що разом з високою кваліфікаційною підготовкою має вузьку спеціалізацію в промисловості. Тому необхідні впровадження нових освітніх програм в технічних університетах, які базуються на сучасних реалізованих дослідженнях реальних виробництв, що забезпечить стабільність зайнятості молоді України залучивши до високоінтелектуальних технологій в сфері смартіндустрії. Тому починаючи з 2023 року в Херсонському національному технічному університеті запроваджено перспективну магістерську освітню програму «Смартпромисловість» та в Центральноукраїнському національному технічному університеті бакалаврську освітню програму «Інжиніринг технологій, мехатроніка та 3D друк» в рамках спеціальності G9 «Прикладна механіка». Основною науковою складовою та інструментом реалізації смарттехнологій в даних освітніх програмах є побудова і дослідження цифрового двійника окремого підприємства певної галузі на основі імітаційної моделі в PLM системі Tecnomatix Plant Simulation компанії Siemens [11, 12].

Зміст випускної кваліфікаційної роботи магістра містить в загальному вигляді такі розділи: 1. Сучасний стан виробництва, аналіз наукових публікацій, визначення мети. 2. Математична, імітаційна модель цифрового двійника підприємства або технічного об'єкта. 3. Опис смартсистеми підприємства, технічні характеристики, ключові показники ефективності. До виконання випускної кваліфікаційної роботи магістра здобувачі розробляють комплексний курсовий проєкт цифрового (Digital Twin) двійника підприємства в предметній області спеціальності та за умов професійної зацікавленості якщо вже працюють офіційно в сфері механічної інженерії на робочих місцях.

Нижченаведеноореалізованівипускнікваліфікаційніроботимагістрівосвітньоїпрограми«Смартпромисловість»:

- проєкт гірничо-металургійного підприємства та дослідження смарттехнологій метрологічної служби.
- проєкт смартфабрики та дослідження інтелектуальних технологій серійного виготовлення деревообробної продукції.
- проєкт та дослідження машинобудівного підприємства з інтелектуальними технологіями виготовлення гідроапаратури та гідравлічної техніки.
- проєкт машинобудівного підприємства з технологіями промислової смартреальності та дослідження ключових показників ефективності.
- проєкт автомобілебудівного підприємства з дослідженням смарттехнологій та цифрових двійників
- проєкт підприємства побутової техніки з дослідженням смарттехнологій та цифрових двійників
- проєкт підприємства виготовлення та ремонту сільгосптехніки з дослідженням смарттехнологій та цифрових двійників
- проєкт авіабудівного підприємства з дослідженням смарттехнологій та цифрових двійників

Нижче наведено реалізацію імітаційної моделі технологічної дільниці реального підприємства з виробництва дерев'яних вікон у середовищі Tecnomatix Plant Simulation з магістерського дослідження «Проєкт смартфабрики та дослідження інтелектуальних технологій серійного виготовлення деревообробної продукції». Розроблено імітаційну модель потокового виробництва, на базі існуючого підприємства (рис. 1).

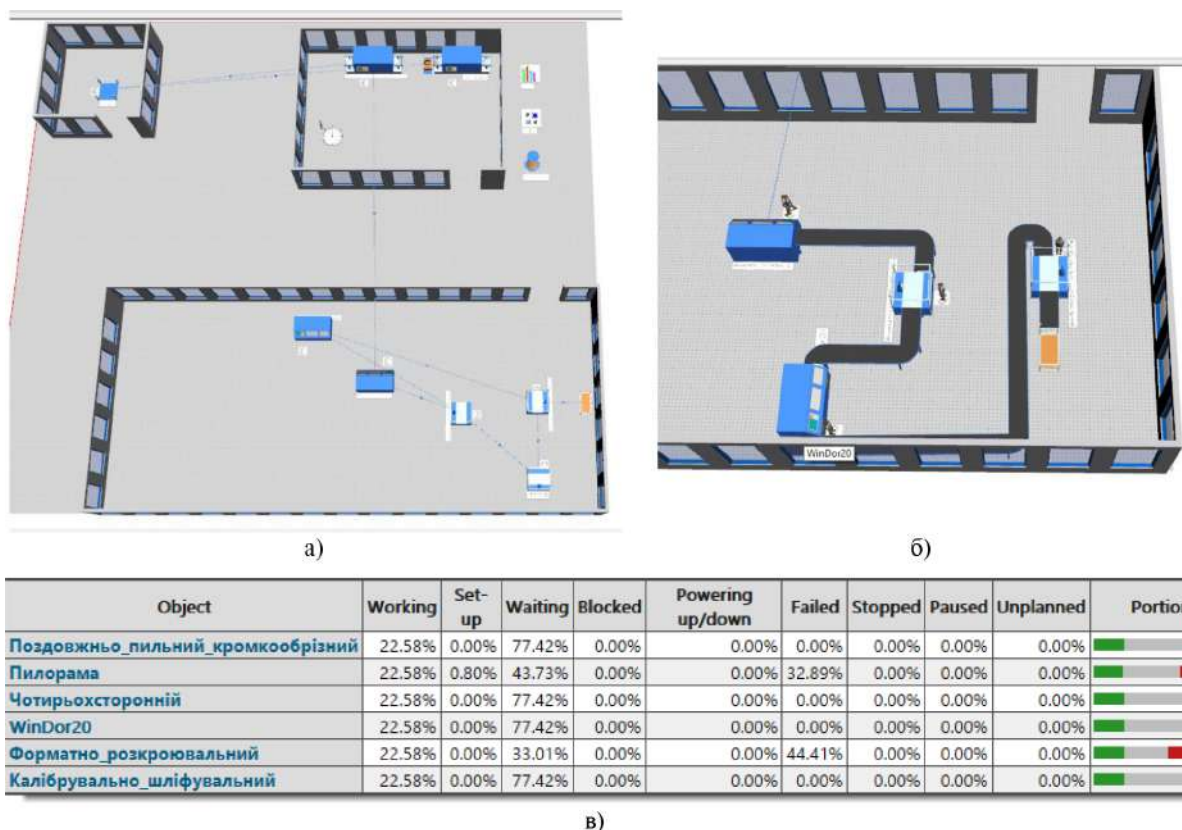


Рис. 1. Імітаційна модель потокового виробництва дерев'яних віконних рам, на базі існуючого підприємства:

а) – імітаційна модель потокового існуючого виробництва; б) – модернізована імітаційна модель потокового виробництва; в) – статистика завантаженості верстатів

Кожен елемент автоматизованої лінії (конвеєри, робочі станції) мають цифрову деталізацію, а їх робота програмується з урахуванням реальних умов виробництва. В наведеному прикладі запропоновано заходи для модернізації підприємства, у вигляді, встановлення конвеєрних стрічок, використання фрезерного верстата з числовим програмним забезпеченням WinDor20. В результаті спостерігається прискорення виробництва, збільшення якості, зменшення браку, та рівномірне розподілення навантаження на всі верстати (рис. 1, б).

Під час аналізу моделі отримано такі показники, як (рис. 1, в) [12, 13]:

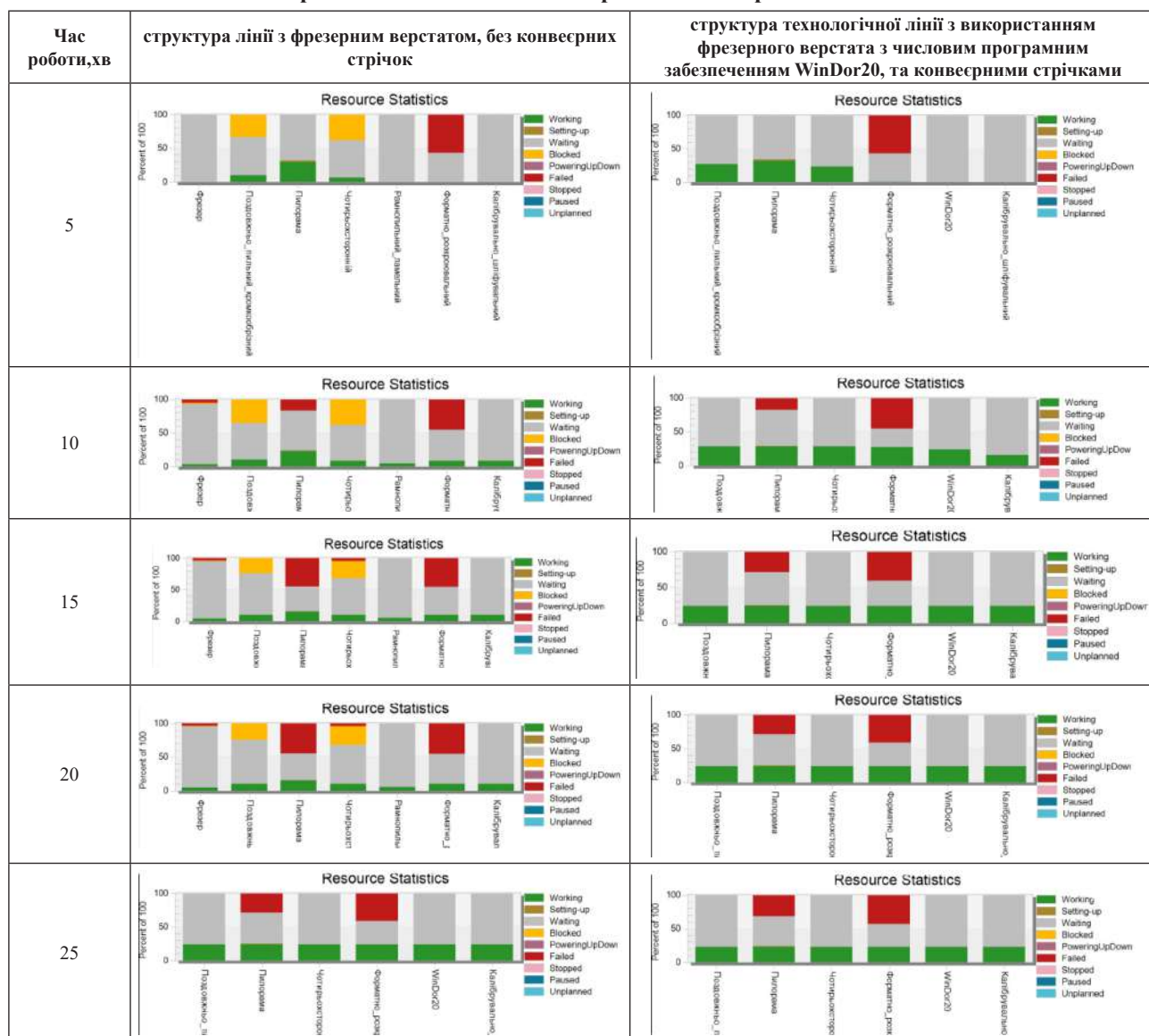
- кількість вироблених деталей за одиницю часу;
- час, який деталі проводять у системі;
- час, який деталі проводять у черзі;
- час, витрачений на транспортування з одного місця в інше;
- час, коли відбуваються поставки;
- створення та використання інвентарю;
- інвентаризація під час процесу;
- відсоток використання машин та працівників.

Для аналізу у реальному часі навантаження на групу верстатів застосовано інструмент «Chart», що будує діаграму статистики стану робочих станцій. В таблиці 1 наведено порівняння потокової лінії під час 25 – хвилин часу симуляції традиційної лінії без застосування фрезерного верстата з числовим програмним забезпеченням WinDor20, та технологічної дільниці з конвеєрними стрічками і з застосуванням фрезерного верстата з числовим програмним забезпеченням WinDor20. Отримавши дані завантаженості верстатів виконаємо порівняльний аналіз ключових показників ефективності (КПЕ) за стандартом ISO 22400, що надає узагальнену методику опису ключових показників ефективності, їх структури та використання. представляється через його визначення, тобто складається з контенту та контексту [14]. Його зручно представляти у табличному вигляді, хоча він пристосований і до інших способів відображення – формату обміну даними, графічному форматі тощо.

Нижче наведені щомісячні КПЕ коефіцієнту браку до і після модернізації технологічної лінії за статистичними даними отриманими в імітаційній моделі потокового виробництва.

Таблиця 1

Порівняння завантаженості верстатів за час роботи 25 хв.



Таблиця 2

???

Опис КІПЕ	
Інформація по контенту	
Назва	Коефіцієнт браку
Ідентифікатор (ID)	001764
Опис	Коефіцієнт браку – це відношення між обсягом браку (SQ) та обсягом виробленою продукції (PQ).
Сфера застосування	Виробниче замовлення вікон, дефекти деревини, сировини
Формула	Коефіцієнт браку = SQ/ PQ
Одиниця вимірювання	%
Діапазон	Мінімальне значення: 0 % Максимальне значення: 100 %
Тренд	Чим нижчий цей показник, тим краще
Контекстна інформація	
Період часу	Щомісячний запит
Цільова аудиторія	Керівництво підприємства
Тип виробництва	Постійне
Діаграма моделі впливу	Рисунок 4.1
Примітки	Коефіцієнт браку також використовується рейтингів

Коефіцієнт браку до впровадження інтелектуальних технологій склав: $5/203 = 0,025 \approx 2,5 \%$, після впровадження інтелектуальних технологій $2/231 = 0,008 \approx 0,8 \%$.

КПЕ у ISO-22400, поділяються на чотири категорії на основі різних процесів у виробничих системах та на одну додаткову категорію: КПЕ виробництва; КПЕ якості; КПЕ технічного обслуговування; КПЕ операцій з товарно-матеріальними запасами; КПЕ енергоменеджменту. Наведемо діаграму моделі впливу – графічне зображення залежностей елементів КПЕ, що корисно для розуміння впливу вихідних значень (рис. 2).

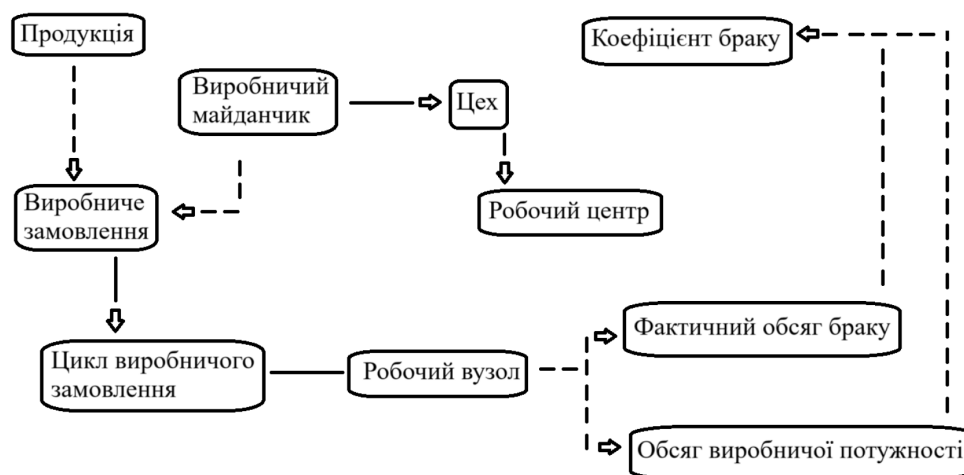


Рис. 2. Діаграма моделі впливу КПЕ коефіцієнт браку

Висновки

Досліджено імітаційні моделі модернізованих по структурі технологічної лінії підприємств на прикладі виробництва вікон з максимально ідентично з високим рівнем реалістичності, що показує реальний стан технології і обладнання, як фізичного об'єкта. Отримано достатню кількість статистично оброблених показань віртуальних датчиків, для створення можливості побудови і додавання до архітектури моделі цифрових двійників промислового комплексу нейромережових моделей, необхідних для визначення певних функціональних показників і ресурсного стану обладнання та його показниками якості. Отримані результати стали підґрунтям оновлення контенту освітніх компонент (лекційні курси, цикли лабораторних робіт, нових дисципліни вільного вибору) в магістерській освітній програмі «Смартпромисловість» Херсонського національного технічного університету та бакалаврської освітньої програми «Інжиніринг технологій, мехатроніка та 3D друк спеціальності G9 «Прикладна механіка» Центральноукраїнського національного технічного університету.

Список використаної літератури

1. Wang Z. Digital Twin Technology in Industry 4.0 / Z. Wang // Impact on Intelligent Logistics and Manufacturing. Intech Open, 2020. Pp. 95–114. –DOI: 10.5772/intechopen.80974
2. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication / M.Grieves //White paper. 2014. No. 1. Pp. 1–7.
3. Uhlemann T. H.-J. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0 / Uhlemann T. H.-J., Steinhilper C. L. R., Steinhilper R. //Procedia CIRP. 2017. Vol. 61. Part of special issue: The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering. Ed. by S. Takata, Y. Umeda, S. Kondoh. Pp. 335–340. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.152
4. Fei Tao. Digital Twin Driven Smart Manufacturing / Fei Tao, Meng Zhang and A. Y. C. Nee. –Academic Press, London, United Kingdom, 2019. 269 p.
5. Lai X. A Review: Machine Tools Digital Twin Modeling And Application / X. Lai, Y. Zhou, L. Jiang and G. Ding // 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC), Portsmouth, United Kingdom, 2021. Pp. 1–6. DOI: 10.23919/ICAC50006.2021.9594151
6. Armendia Mikel. Twin-Control: A Digital Twin Approach to Improve Machine Tools Lifecycle /Armendia Mikel, Ghassempouri Mani, Ozturk Erdem, Peysson, Flavien. Springer Cham, 2019. 298 p. DOI:10.1007/978-3-030-02203-7
7. Cao H. The concept and progress of intelligent spindles: a review/ Cao H., Zhang X., Chen X. // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2017. No.112. Pp.21–52. DOI:https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.10.005
8. Wójcicki J. Potential for smart spindles adoption as edge computing nodes in Industry 4.0 / J. Wójcicki, M. P. Leonesio, G. Bianchi // Procedia CIRP. 2021. No. 99. Pp. 86–91.

9. Wang, Yübo. Integration of model based system engineering into the digital twin concept / Wang Yübo, Steinbach Tanja, Klein Jonathan, Anderl Reiner // *Procedia CIRP*. 2021. Vol. 100. Pp. 19–24.–DOI 10.1016/j.procir.2021.05.003
10. Сапон С. П. Цифрові двійники в металообробці: термінологія і проблематика / Сапон С. П., Данильченко Ю. М., Петраков Ю. В., Охріменко О. А. // *Сучасні технології промислового комплексу – 2024: матеріали VIII міжнар. наук.-практ. конференції (17–19 вересня 2024 р., м. Херсон, м. Хмельницький) / за ред. Д. О. Дмитрієва. Херсон : Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В. С., 2024. с. 215–217. <http://eir.kntu.net.ua/jspui/handle/123456789/2014>*
11. Tecnomatix Plant Simulation: Compact Student Training. Siemens PLM Software, 2017. 177 p.
12. Комп'ютерне моделювання технологічних процесів [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» за освітньо-науковою програмою магістерської підготовки – Технологія машинобудування / Б. С. Воронцов, Ю. М. Бецко, О. О. Мельник; КПП ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2023. 186 с.
13. Воронцов Б. С. Імітаційне моделювання механоскладального виробництва/ Б. С. Воронцов, І. А. Бочарова // *Нові технології в машинобудуванні. Харків: ТОВ «Планета-Прінт», 2021. С. 38–39.*
14. ДСТУ ISO 22400 -2:2019 Ключові показники ефективності (КПЕ) для керування виробничими операціями Частина 2: Визначення та описи. ДП «УкрНДНЦ». 60 с.

References

1. Wang, Z. (2020). Digital twin technology in Industry 4.0. In *Impact on intelligent logistics and manufacturing* (pp. 95–114). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80974>
2. Grieves, M. (2014). Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication (White paper No. 1, pp. 1–7).
3. Uhlemann, T. H.-J., Steinhilper, C. L. R., & Steinhilper, R. (2017). The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 61, 335–340. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.152>
4. Tao, F., Zhang, M., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin driven smart manufacturing. Academic Press.
5. Lai, X., Zhou, Y., Jiang, L., & Ding, G. (2021). A review: Machine tools digital twin modeling and application. In *Proceedings of the 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.23919/ICAC50006.2021.9594151>
6. Armendia, M., Ghassempouri, M., Ozturk, E., & Peysson, F. (2019). Twin-control: A digital twin approach to improve machine tools lifecycle. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-02203-7>
7. Cao, H., Zhang, X., & Chen, X. (2017). The concept and progress of intelligent spindles: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 112, 21–52. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.10.005>
8. Wójcicki, J., Leonesio, M. P., & Bianchi, G. (2021). Potential for smart spindles adoption as edge computing nodes in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 99, 86–91.
9. Wang, Y., Steinbach, T., Klein, J., & Anderl, R. (2021). Integration of model-based systems engineering into the digital twin concept. *Procedia CIRP*, 100, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.003>
10. Sapon, S. P., Danylchenko, Yu. M., Petrakov, Yu. V., & Okhrimenko, O. A. (2024). Digital twins in metalworking: Terminology and problem statement. In D. O. Dmytriiev (Ed.), *Modern technologies of the industrial complex – 2024: Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference* (pp. 215–217). FOP Vyshemyrskyi V. S. <http://eir.kntu.net.ua/jspui/handle/123456789/2014>
11. Siemens PLM Software. (2017). Tecnomatix Plant Simulation: Compact student training.
12. Vorontsov, B. S., Betsko, Yu. M., & Melnyk, O. O. (2023). Computer modeling of technological processes (Electronic textbook). Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
13. Vorontsov, B. S., & Bocharova, I. A. (2021). Simulation modeling of mechanical assembly production. In *New technologies in mechanical engineering* (pp. 38–39). Planeta-Print.
14. Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality. (2019). DSTU ISO 22400-2:2019 Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management – Part 2: Definitions and descriptions.

Дата першого надходження статті до видання: 10.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

К. В. ДОЛЯ

доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри автомобілів та транспортної інфраструктури
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0002-4693-9158

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ МАРШРУТНОЇ ШВИДКОСТІ ЇЗДКИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОМОБІЛЬНИХ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ В ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ

Визначення оптимальної маршрутної швидкості їздки при експлуатації автомобільних засобів транспорту в пасажирських перевезеннях. К. Доля. У статті розглянуто задачу обґрунтування оптимальної маршрутної швидкості їздки для автобусних пасажирських перевезень за умов мінливості дорожньої ситуації та стохастичного характеру затримок на перегонах, перехрестях і зупинках. Актуальність теми зумовлена тим, що завищення нормативної швидкості підвищує ризик порушення розкладу та зростання експлуатаційних втрат, тоді як заниження призводить до збільшення оборотного часу, потреби у додатковому парку та погіршення транспортної доступності.

Метою дослідження є розроблення підходу до встановлення нормативного часу рейсу і відповідної маршрутної швидкості, що забезпечують заданий рівень надійності виконання розкладу та узгоджуються з ресурсними й економічними обмеженнями перевізника. Запропоновано визначати оптимальну швидкість через квантілі фактичного часу поїздки: $v_m^* = L/Q_T(p^*)$. Для підвищення керованості параметра швидкості використано декомпозицію часу рейсу на компоненти руху між зупинками, стоянок та затримок, що дозволяє пов'язати нормативи зі специфічними причинами втрат часу та сформулювати напрямки організаційно-технологічних заходів (пріоритет руху, оптимізація посадки/оплати, коригування зупиночної мережі).

У межах методики описано узгодження нормативного часу рейсу з інтервалом руху, цикловим часом і потребою в рухомому складі, що дає змогу оцінювати наслідки вибору p^* для ресурсів і витрат експлуатації. Виконано теоретичний експеримент для автобуса Mercedes-Benz Tourismo, який демонструє покроковий розрахунок нормативного часу, резерву (buffer time) та оптимальної маршрутної швидкості за заданого рівня надійності. Отримані результати можуть бути використані під час планування розкладів, резервів часу та оцінювання компромісу між якістю обслуговування (пунктуальність, регулярність) і економічними показниками роботи маршруту.

Ключові слова: маршрутна швидкість; нормативний час рейсу; надійність розкладу; квантілі; резерв часу; пасажирські перевезення; автобус.

K. V. DOLIA

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Automobiles and Transport Infrastructure
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0002-4693-9158

DETERMINATION OF OPTIMAL ROUTE DRIVING SPEED WHEN USING VEHICLES IN PASSENGER TRANSPORTATION

Determination of the optimal route speed of travel when operating motor vehicles in passenger transportation. K. Dolya. The article considers the problem of substantiating the optimal route speed of travel for bus passenger transportation under conditions of variability of the traffic situation and stochastic nature of delays at races, intersections and stops. The relevance of the topic is due to the fact that overestimating the standard speed increases the risk of schedule disruption and increased operational losses, while underestimating it leads to an increase in turnaround time, the need for additional fleet and deterioration of transport accessibility.

The purpose of the study is to develop an approach to establishing the standard trip time and the corresponding route speed, which provide a given level of reliability of schedule execution and are consistent with the resource and economic constraints of the carrier. It is proposed to determine the optimal speed through the quantile of the actual trip time $v_m^* = L/Q_T(p^*)$. To increase the controllability of the speed parameter, the decomposition of the trip time into components of movement between stops, parking lots and delays was used, which allows linking the standards with specific causes of time loss and forming directions for organizational and technological measures (priority of movement, optimization of boarding/payment, adjustment of the stop network).



© К. В. Доля, 2026

Стаття поширюється на умовах відкритої ліцензії CC BY 4.0

The methodology describes the coordination of the standard trip time with the movement interval, cycle time and the need for rolling stock, which makes it possible to assess the consequences of choosing p^* for resources and operating costs. A theoretical experiment was performed for the Mercedes-Benz Tourismo bus, which demonstrates the step-by-step calculation of the standard time, buffer time and optimal route speed for a given level of reliability. The results obtained can be used in planning schedules, time reserves and assessing the trade-off between service quality (punctuality, regularity) and economic performance of the route.

Key words: route speed; standard trip time; schedule reliability; quantile; time reserve; passenger transportation; bus.

Постановка проблеми

Маршрутна швидкість поїздки пасажирського автомобільного транспорту є одним із ключових показників, що визначає якість транспортного обслуговування та економічну ефективність роботи перевізника. Вона безпосередньо впливає на час у дорозі для пасажирів, дотримання розкладу, рівень регулярності руху, необхідну кількість рухомого складу на маршруті та, відповідно, на експлуатаційні витрати. Для міських і приміських перевезень характерні часті зупинки, перехрестя, нерівномірні умови руху та обмеження пропускної спроможності вулично-дорожньої мережі, через що фактична швидкість істотно змінюється в часі та просторі.

На практиці встановлення «планової» (нормативної) маршрутної швидкості часто здійснюється за спрощеними підходами: за середніми значеннями за минулий період, за результатами разових замірів або за укрупненими нормативами. Такі підходи недостатньо враховують мінливість транспортних умов упродовж доби (пікові/міжпікові години), тижня (будні/вихідні), сезонні коливання, дорожні роботи, погодні чинники, а також стохастичні затримки на перехрестях і на зупинках під час посадки/висадки. Унаслідок цього розклади можуть бути або завищено напруженими (що провокує запізнення, «зриви» інтервалів, накопичення транспорту та скарги пасажирів), або надмірно «розтягнутими» (що знижує привабливість перевезень і спричиняє зайві витрати часу та ресурсів).

Потреба у визначенні оптимальної маршрутної швидкості зумовлена необхідністю узгодити суперечливі критерії учасників транспортного процесу. Для пасажирів важливими є мінімізація часу поїздки та підвищення надійності прибуття; для перевізника – зменшення собівартості, забезпечення виконання рейсів і раціональне використання рухомого складу та персоналу; для органів управління – дотримання стандартів доступності та безпеки, зменшення заторів і негативного впливу на довкілля. Занадто висока цільова швидкість підштовхує до ризикованого керування та «наздоганяння» графіка, підвищує варіативність часу руху і загалом погіршує безпеку. Занадто низька – призводить до падіння продуктивності рухомого складу, збільшення оборотного часу та потреби в додаткових транспортних засобах для підтримання заданого інтервалу.

Додатковою складністю є структурна неоднорідність компонент часу поїздки. Загальний час проходження маршруту формується з часу руху між зупинками, затримок на регульованих і нерегульованих перехрестях, часу простою на зупинках (який залежить від пасажирообміну, конструкції дверей, способу оплати, дисципліни посадки тощо), а також можливих простоїв через позаштатні ситуації. Відповідно, оптимізація маршрутної швидкості не може зводитися лише до вибору «середньої» швидкості: необхідно враховувати розподіл затримок, наявність резерву часу у розкладі та допустимий рівень ризику невиконання рейсу у заданому часовому вікні.

У сучасних умовах розвиток систем супутникового моніторингу, автоматизованих систем оплати проїзду та підрахунку пасажирів створює передумови для переходу від укрупнених нормативів до обґрунтованого вибору цільової маршрутної швидкості на основі даних. Однак наявність великих масивів спостережень сама по собі не гарантує коректного рішення: потрібні методи агрегування та фільтрації даних, відокремлення типових режимів руху від аномалій, а також постановка критерію оптимальності, який одночасно враховує якість обслуговування та витрату складову.

Таким чином, актуальною науково-практичною проблемою є розроблення підходу до визначення оптимальної маршрутної швидкості поїздки при експлуатації автомобільних засобів транспорту в пасажирських перевезеннях, який враховує мінливі умови руху та стохастичний характер затримок, забезпечує заданий рівень надійності виконання розкладу і дозволяє мінімізувати сумарні втрати часу та експлуатаційні витрати. Розв'язання цієї проблеми є передумовою підвищення ефективності планування роботи маршруту, стабілізації інтервалів руху та покращення якості транспортного обслуговування населення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика визначення та обґрунтування оптимальної маршрутної швидкості поїздки в пасажирських автомобільних перевезеннях перебуває на перетині досліджень з моделювання часу руху (run time), часу простою на зупинках (dwell time), надійності (reliability), керування регулярністю руху (headway control) та оптимізації розкладів і резервів часу (slack, recovery time). У сучасних роботах переважає даноорієнтований підхід із використанням даних AVL/GPS, APC, смарткарт, а також стандартизованих потоків GTFS/GTFS-RT, що дозволяє переходити від укрупнених нормативів до статистично обґрунтованих рішень [1–4].

Значний пласт публікацій присвячено прогнозуванню часу поїздки та часу прибуття як бази для підвищення якості сервісу й стабілізації виконання розкладу. Розвиваються як класичні часові моделі, так і глибоке навчання: від підходів із використанням авторегресійної структури та врахуванням логнормальних розподілів тривалості

поїздки [5] до нейромережових моделей (ConvLSTM із self-attention) для прогнозування часу руху по сегментах та очікування на зупинках [1]. У прикладних дослідженнях демонструється виграш гібридних моделей (наприклад, LSTM–SVR) для прогнозування «розкладного часу»/тривалості рейсу [6], а також використання додаткових пояснювальних змінних (зокрема погоди) для покращення точності прогнозів [7]. Зростає увага до масштабованих рішень на рівні міста та переносимості моделей між мережами: показано перспективність використання відкритих і стандартизованих даних GTFS/GTFSRT для узагальнення моделей на різні міста [3], а також запропоновано «city-scale» конвеєри прогнозування затримок із багатороздільною ознаковою інженерією [8].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із моделюванням складових часу поїздки, насамперед часу простою на зупинках. Показано, що за певних умов навіть за відсутності прямого підрахунку пасажирів можна оцінювати профіль попиту та пасажиронавантаження на маршруті за даними dwell time, використовуючи байєсівські підходи [2]. Практичні результати також підтверджують суттєвий вплив технологій оплати на тривалість стоянки: зокрема, перехід на безготівкові/смарткарт платежі зменшує часові витрати на посадку порівняно з готівкою [9]. Водночас багато робіт підкреслюють, що dwell time є високоваріативною величиною, чутливою до конструкції транспортного засобу, організації посадки, ширини дверей, наявності валідаторів, потоків у салоні та випадкових затримок.

Суттєва частина літератури концентрується на показниках надійності та регулярності руху, оскільки «оптимальна» маршрутна швидкість в розкладі має забезпечувати не лише середній час поїздки, а й прийнятний ризик запізнення. У практиці планування дедалі частіше використовують підходи, що оперують не середніми, а квантильними/ймовірнісними характеристиками часу руху, резервом часу та рівнем сервісу. Наявність стандартизованих реального часу даних (GTFS-RT) та метрик точності прогнозів/пунктуальності сприяє відтворюваності аналізу та можливості порівнювати рішення між мережами [10, 11]. Зокрема, розвиток методів оцінювання доступності та надійності під невизначеністю часу в дорозі свідчить про зближення задач «операційної надійності» та «планувальної доступності» [11].

У роботах з оперативного керування рухом (зокрема запобігання «збиранню» автобусів у пачки) маршрутна швидкість розглядається як похідна від керуючих дій (утримання на зупинках, пропуск зупинок, обгін/регулювання інтервалів), що змінюють розподіл затримок і, як наслідок, фактичний час проходження маршруту. У цьому контексті оптимальна швидкість у розкладі має узгоджуватися зі стратегіями керування регулярністю та допуском до зміни тривалості стоянок.

Підсумовуючи аналіз сучасних джерел, можна виділити такі аспекти, що розкриті недостатньо й залишаються актуальними для подальших досліджень:

Переносимість результатів між маршрутами/містами: більшість моделей добре працює на «своїх» даних, але потребує адаптації при зміні мережі; перспективним є використання стандартизованих потоків GTFS/GTFS-RT та методів доменної адаптації [3, 8].

Окремо слід підкреслити, що маршрутна швидкість є не лише «часовим» показником сервісу, а й інтегральним чинником, який впливає на параметри експлуатації транспортних засобів і економіку роботи підприємства. Зі збільшенням фактичної швидкості (за незмінних умов руху) зменшується оборотний час і зростає продуктивність одиниці рухомого складу, що може знижувати потребу в кількості автобусів для забезпечення заданого інтервалу. Водночас прагнення до високих швидкостей у змішаному потоці часто супроводжується більш агресивним режимом розгонів/гальмувань і підвищенням нерівномірності руху, що збільшує енергетичні витрати та прискорює знос окремих вузлів (насамперед гальмівної системи, шин, елементів підвіски), а також впливає на витрати на технічне обслуговування та ремонт.

У роботах, присвячених оцінюванню паливно-енергетичних та вартісних показників міських автобусів, показано, що режим руху та середні швидкості/інтенсивності розгонів суттєво впливають на споживання енергії, викиди та сукупну вартість експлуатації (TCO/LCOD) [12]. Такі результати особливо важливі для міських маршрутів із частими зупинками, де зниження швидкості через затори або нераціональні режими керування призводить до непропорційного збільшення витрат палива/енергії «на кілометр» та «на пасажиро-кілометр», а також до збільшення часу роботи двигуна/силової установки в неефективних режимах.

З точки зору планування ТО та ремонтів, вплив швидкісного режиму проявляється як через зміну навантажень на агрегати, так і через зміну річного пробігу (за однакової кількості змін/рейсів) та загального напрацювання в мотогодинах. Вищі швидкості (і, відповідно, менший оборотний час) можуть збільшувати кількість виконаних рейсів за зміну і, як наслідок, річний пробіг, що наближує настання регламентних ТО за пробігом, тоді як затримки і «повільний» режим підвищують частку мотогодин простою/руху на малих швидкостях і можуть посилювати теплові/режимні навантаження. У підсумку оптимальна маршрутна швидкість має узгоджуватися з політикою ТОiP, доступністю резервного рухомого складу та допустимими витратами на підтримання працездатності.

З економічної точки зору оптимальна швидкість також пов'язана з окупністю витрат на експлуатацію: при надмірно низьких швидкостях зростає потреба у додаткових транспортних засобах і водіях для підтримання заданого інтервалу, що збільшує фонд оплати праці та капітальні/амортизаційні витрати; при завищених швидкостях збільшуються ризики нестабільного виконання розкладу, витрати на позапланові ремонти та погіршуються умови

безпеки. Таким чином, у сучасній літературі формується розуміння необхідності багатокритеріального визначення маршрутної швидкості як керованого параметра, що впливає одночасно на рівень сервісу, витрати ресурсів і експлуатаційну надійність.

Наведені прогалини підтверджують доцільність розроблення підходу до визначення оптимальної маршрутної швидкості, що базується на даних, враховує невизначеність і надійність, та формує практичні правила для планування розкладу, резервів часу та витрат на експлуатацію.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є обґрунтування підходу до визначення оптимальної маршрутної швидкості поїздки при експлуатації автомобільних засобів транспорту в системі пасажирських перевезень з урахуванням мінливих умов руху, стохастичного характеру затримок і вимог до надійності виконання розкладу.

Об'єкт дослідження – процес організації та виконання пасажирських автомобільних перевезень на маршрутній мережі (міській/приміській), що характеризується змінними дорожніми умовами, пасажиропотоками та режимами зупинок.

Предмет дослідження – методи та моделі визначення (нормування) маршрутної швидкості поїздки і пов'язаних із нею параметрів планування роботи маршруту (часу рейсу, резервів часу, інтервалів руху) на основі статистичного опису складових часу руху та критерію оптимальності, який поєднує показники якості обслуговування й експлуатаційні витрати.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати складові часу поїздки на маршруті та визначити показники, що характеризують маршрутну швидкість і надійність виконання розкладу.
2. Обґрунтувати критерій і методику визначення оптимальної маршрутної швидкості з урахуванням мінливих умов руху, стохастичних затримок та експлуатаційних витрат.
3. Апробувати запропонований підхід на даних реального маршруту (або групи маршрутів) та сформулювати практичні рекомендації для планування розкладу й резервів часу.

Викладення основного матеріалу дослідження

Огляд методів сучасної науки й практики для розв'язання поставлених завдань

Для визначення оптимальної маршрутної швидкості як планового параметра (що забезпечує компроміс між часом поїздки, надійністю виконання розкладу та витратами експлуатації) у сучасній науці й практиці застосовують низку взаємодоповнюючих підходів. Нижче розглянуто шість методів, їх формалізацію, сильні/слабкі сторони та придатність до розв'язання задач дослідження.

Метод 1. Детерміноване нормування швидкості/часу рейсу за середніми значеннями. Найпоширеніший у практиці підхід полягає у встановленні планового часу рейсу як суми середніх часів руху між зупинками та середніх стоянок. Для маршруту довжиною L планова маршрутна швидкість визначається як (1):

$$v_m = L/T_m T_m = \sum_{i=1}^n t_{i,run} + \sum_{j=1}^{(n_s)} t_j^d well, \quad (1)$$

де $t_{i,run}$ – середній час проходження i -го перегону, $t_j^d well$ – середній час стоянки на j -й зупинці.

Графічно це відповідає «плоскому» профілю планового часу за добу з невеликим коригуванням для пікових годин (рис. 1).

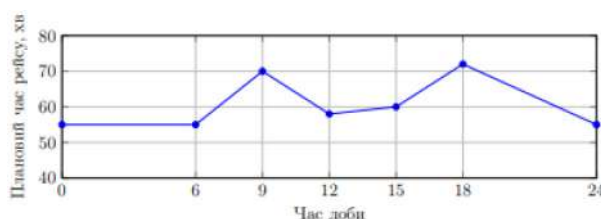


Рис. 1. Приклад детермінованого нормування планового часу рейсу за середніми значеннями

Перевагами є простота, прозорість, мінімальні вимоги до даних, а недоліками – ігнорування варіативності й хвостів розподілу часу; високий ризик запізнь у піки або надлишкового «розтягування» у міжпікові години, що погіршує якість сервісу.

Метод 2. Стохастичне нормування на основі квантилей і «резерву часу» (reliability-based slack). Сучасна практика планування орієнтується на ймовірнісні характеристики тривалості поїздки. Якщо T – випадкова величина часу рейсу, то плановий час задають через квантиль рівня p (2)

$$T_m = Q_T(p) \quad Pr(T \leq T_m) = p. \quad (2)$$

А резерв визначають як (3):

$$s = T_m - E[T]. \quad (3)$$

Такий підхід природно пов'язує планову швидкість з цільовою надійністю (часткою рейсів без запізнення). Подібні підходи активно використовуються в задачах оптимізації резервів часу у розкладах і підвищення робастності (на прикладі рейкових систем) [6].

Метод має такі переваги, як: керована надійність; придатність до сегментації за періодами доби; узгодженість з «ризик-орієнтованим» управлінням. Недоліками є те що він потребує достатнього обсягу даних; чутливий до якості очищення/антианомального фільтру; не дає прямого пояснення причин затримок без додаткової декомпозиції.

Метод 3. Декомпозиційні моделі складових часу рейсу (run time + dwell time + delays)

Для підвищення керованості параметра v_m доцільно розкласти час рейсу (4):

$$T = \sum (i=1)^n t_i^r un + \sum (j=1)^{(n_s)} t_j^d well + \sum (k=1)^{(n_d)} t_k^i nt, \quad (4)$$

де t_k^{int} – затримки на перехрестях/вузьких місцях. Для моделювання t^{dwell} застосовують стохастичні підходи до часу посадки/висадки [3], а також інверсні задачі оцінювання попиту за dwell time у разі дефіциту прямих спостережень [2]. Метод забезпечує можливість адресно впливати на компоненти (наприклад, виділення смуг/пріоритет на перехрестях, оптимізація посадки).

Сильні сторони – причинна інтерпретованість; підтримка заходів управління інфраструктурою та технологією перевезень. Слабкі сторони: вища складність; потрібні узгоджені дані (AVL, зупинки, перехрестя, пасажирообмін).

Метод 4. Прогнозування часу поїздки (ML/DL) для адаптивного нормування швидкості. Для адаптивного планування використовують моделі прогнозування T на основі ознак x (час доби, день тижня, погодні умови, стан мережі тощо) (5):

$$T = \sum (i=1)^n t_i^r un + \sum (j=1)^{(n_s)} t_j^d well + \sum (k=1)^{(n_d)} t_k^i nt, \quad (5)$$

де f_θ – параметризована модель (наприклад, ConvLSTM із механізмом уваги [1] або інші глибокі моделі прогнозування). Перевага – можливість оперативно актуалізувати планові значення та визначати динамічні «коридори» планового часу.

Сильні сторони методу є висока точність за наявності даних; адаптивність; можливість прогнозувати не лише середнє, а й квантілі (через квантільну регресію). Слабкі сторони – складність валідації та пояснюваності; ризик «переобучення»; потреба в стабільному потоці даних і процедурі моніторингу якості.

Метод 5. Оптимізація розкладів і ресурсів (надійність–вартість) у плануванні. Маршрутна швидкість у розкладі пов'язана з оборотним часом і потребою у парку. Для заданого інтервалу h та циклового часу C (включно з відстійно-резервним часом) потреба в ТЗ (6):

$$N = C/h, \quad C = 2T_m + t^{turn} + s^{rec}, \quad (6)$$

де t^{turn} – час розвороту/відстою, s^{rec} – резерв відновлення розкладу. У сучасних постановках планування підкреслюють компроміс «вартість–надійність» у задачах розкладу/випуску, включно з багатодеповим плануванням за стохастичного часу руху [7]. Це дозволяє прямо пов'язати вибір v_m з витратами на парк, водіїв і штрафами за запізнення.

Сильні сторони: забезпечує економічне обґрунтування; дає прямий зв'язок між швидкістю, інтервалом і потребою в ресурсах. Слабкі сторони: потребує формалізації витрат і обмежень; складність розв'язання для великих мереж без спеціальних алгоритмів.

Метод 6. Оперативне керування регулярністю (headway control, holding, RL). Оскільки фактична швидкість й інтервали є взаємопов'язаними, застосовують керування «утриманням» на зупинках та інші стратегії для зменшення bunching. У сучасних роботах активно розвиваються RL-підходи до holding-контролю [12]. Формально це задача вибору керуючої дії a_t (час утримання) в стані s_t (головні інтервали/навантаження) для максимізації очікуваної сумарної винагороди (7):

$$\max_{a_t} \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r(s_t, a_t) \right]. \quad (7)$$

Сильні сторони: здатність працювати зі стохастикою та складною динамікою; покращення регулярності й часу очікування. Слабкі сторони: вимоги до симулятора/даних; складність впровадження й пояснюваності; ризики нестабільності при переносі в реальні умови.

Запропоновано методу для розв'язання поставлених завдань й рекомендації визначення оптимальної маршрутної швидкості їздки при експлуатації автомобільних засобів транспорту в пасажирських перевезеннях. Для розв'язання поставлених у роботі завдань доцільно застосувати комбінований, даноорієнтований підхід, у якому оптимальна маршрутна швидкість розглядається як керований параметр розкладу (нормативний час рейсу T_m), що

має забезпечувати заданий рівень надійності та мінімізувати сукупні витрати. Сутність підходу полягає у поєднанні: (1) квантільного нормування часу рейсу (ризик-орієнтований резерв часу), (2) декомпозиції часу рейсу на керовані компоненти (рух/зупинки/вузли затримок) та (3) економічного узгодження вибраного T_m з потребою у ресурсах (N) і допустимими експлуатаційними витратами.

Суть методу.

Припустимо T – випадкова величина фактичного часу проходження маршруту довжиною L . Плановий час рейсу задається як квантіль (8):

$$T_m = Q_T(p), \quad \Pr(T \leq T_m) = p, \quad (8)$$

де $p \in (0, 1)$ – цільова надійність (наприклад, $p = 0.85 \div 0.95$ залежно від вимог до пунктуальності). Тоді планова маршрутна швидкість розраховується згідно (8). Відповідно, оптимальна маршрутна швидкість їздки визначається як значення, що відповідає обраному рівню надійності p^* та є узгодженим з ресурсними/економічними обмеженнями (9):

$$v_m^* = L/T_m^* = L/Q_T(p^*), \quad (9)$$

де v_m – планова (нормативна) маршрутна швидкість, км/год; v_m^* – оптимальна маршрутна швидкість, км/год; L – довжина маршруту (у напрямку), км; T_m – плановий (нормативний) час рейсу, год; T_m^* – оптимальний нормативний час рейсу, год; T – фактичний час рейсу як випадкова величина; $Q_T(p)$ – квантіль розподілу T рівня p ; p – заданий рівень надійності виконання (ймовірність виконати рейс не довше T_m); p^* – оптимальний рівень надійності, що мінімізує сумарні втрати. Якщо необхідно явно врахувати витрати, то p^* можна вибирати з задачі мінімізації сумарних втрат (вартість запізнення + вартість резерву часу):

$$p^* = \arg \min_{p \in [p_{min}, p_{max}]} (C_{late} \cdot \Pr(T > Q_T(p)) + C_{slack} \cdot (Q_T(p) - E[T])), \quad (10)$$

де p_{min}, p_{max} – допустимий діапазон рівня надійності; C_{late} – питомі втрати/штрафи за запізнення (еквівалент вартості невиконання вимог пунктуальності); C_{slack} – «ціна» резерву часу (додаткові витрати через збільшення оборотного часу, потребу в ресурсах тощо); $\Pr(T > Q_T(p))$ – імовірність запізнення (перевищення нормативу); $E[T]$ – математичне сподівання фактичного часу рейсу. Після визначення p^* обчислюють за (11):

$$T_m^* = Q_T(p^*) \quad \text{та} \quad v_m^* = L/T_m^*. \quad (11)$$

Для керованості та пояснюваності вводиться декомпозиція (12):

$$T = T_{run} + T_{dwell} + T_{del}, \quad (12)$$

де T_{run} – сумарний час руху між зупинками, T_{dwell} – сумарний час стоянок, T_{del} – затримки (перехрестя, затори, позапланові події). Така структура дозволяє не лише «поставити» T_m , а й сформулювати практичні заходи впливу: зменшення T_{dwell} (оплата/посадка), зниження T_{del} (пріоритет на перехрестях), стабілізація T_{run} (виділені смуги тощо).

Практична реалізація методу може бути подана як послідовність кроків.

Збір даних: для кожного рейсу отримати часові мітки проходження зупинок/контрольних точок (AVL/GPS), фактичні тривалості стоянок (за наявності), а також календарні ознаки (година, день тижня, сезон) і зовнішні чинники (погода, дорожні роботи – за можливості).

Очищення та сегментація: вилучити/помітити аномальні рейси (ДТП, перекриття), сформувати однорідні групи умов (наприклад, «будній-пік», «будній-міжпік», «вихідний»).

Оцінювання розподілу T : для кожної групи оцінити емпіричний розподіл часу рейсу та його квантілі $Q_T(p)$. За потреби окремо оцінити розподіли компонент T_{run} , T_{dwell} , T_{del} та їх внесок у варіативність.

Вибір рівня надійності p : визначити p як компроміс між якістю сервісу та витратами. Практично p може задаватися нормативом пунктуальності або підбиратися за критерієм мінімуму сумарних втрат (штрафи за запізнення + вартість резерву часу).

Розрахунок T_m та v_m : прийняти $T_m = Q_T(p)$ і визначити $v_m = L/T_m$ окремо для кожної часової групи; сформувати резерв $s = T_m - E[T]$ як контрольований параметр розкладу.

Узгодження з ресурсами: для заданого інтервалу h оцінити потребу в ТЗ Res (13):

$$N = \frac{C}{h}, \quad C = 2T_m + t^{turn} + s^{rec}, \quad (13)$$

та перевірити відповідність наявному парку/кадрам; у разі конфлікту – переглянути p , h або заходи зі зменшення складових T .

Переваги підходу полягають у тому, що він безпосередньо пов'язує нормативний час/швидкість із вимірюваною надійністю через квантілі; дає можливість адаптації за періодами доби та типами днів; забезпечує інтерпретованість через декомпозицію $T_{run} + T_{dwell} + T_{del}$; дозволяє економічно обґрунтувати рішення через залежність потреби у ресурсах N від T_m .

Водночас підхід має обмеження:

- квантільне нормування є «даними керованим»: при зміні умов (масштабні ремонти доріг, зміна схем руху, впровадження нової оплати) попередні розподіли T можуть швидко застарівати, тому потрібні регламенти регулярного оновлення норм.
- емпіричні квантілі чутливі до обсягу вибірки: для рідкісних режимів (нічні рейси, святкові дні) оцінка $Q_T(p)$ може бути нестійкою.
- сам по собі вибір p не вирішує причин затримок: без паралельних організаційних/інфраструктурних заходів резерв часу може перетворитися на «приховане» збільшення тривалості поїздки.
- економічне узгодження потребує коректної оцінки вартості запізнення й вартості додаткового резерву (у т.ч. через парк/водіїв/ТОіР), що не завжди доступно в первинних даних підприємства.

Незважаючи на зазначені обмеження, запропонований комбінований підхід є практично реалізовним і достатньо гнучким для умов міських/приміських маршрутів: він дозволяє обґрунтовано встановлювати нормативну швидкість, управляти надійністю через параметр p та пов'язувати отримане рішення з ресурсами і витратами експлуатації.

Теоретичний експеримент з визначення оптимальної маршрутної швидкості проведено для Mercedes-Benz Tourismo. Наведемо приклад теоретичного експерименту для визначення v_m^* за обраною методикою квантільного нормування з урахуванням надійності. Розглядається автобус *MercedesBenz Tourismo*, що виконує регулярний рейс довжиною $L = 42$ км (в одному напрямку) з $n_s = 10$ зупинками. Мета – визначити нормативний час рейсу T_m^* і відповідну оптимальну маршрутну швидкість v_m^* для забезпечення цільової надійності виконання $p^* = 0.90$.

Припустимо, що за результатами спостережень (або моделювання) фактичний час рейсу T в умовах «будній день, денний період» може бути наближено нормальною випадковою величиною (14):

$$T \sim N(\mu, \sigma^2), \quad (14)$$

де $\mu = 60$ хв – середній час рейсу, $\sigma = 6$ хв – середньоквадратичне відхилення (варіативність через затори, перехрестя, пасажирообмін). Для такого наближення квантіль (15):

$$Q_T(p) = \mu + z_p \sigma, \quad (15)$$

де z_p – квантіль стандартного нормального розподілу. Для $p^* = 0.90$ маємо: $z_{0.90} \approx 1.2816$, отже: розрахунок оптимальної маршрутної швидкості. Переведемо час у години: год:

$$T_m^* = Q_T(0.90) = 60 + 1.2816 \cdot 6 \approx 67.7 \text{ хв.}$$

Тоді –

$$v_m^* = \frac{L}{T_m^*} = \frac{42}{1.128} \approx 37.2 \text{ км/год.}$$

Отримане значення v_m^* є оптимальним у сенсі забезпечення $Pr(T \leq T_m^*) = 0.90$ за прийнятих статистичних характеристик.

Резерв часу та інтерпретація. Резерв (slack) становить:

$$T_m^* = Q_T(0.90) = 60 + 1.2816 \cdot 6 \approx 67.7 \text{ хв.,}$$

тобто в розкладі доцільно передбачити близько 8 хв на компенсацію стохастичних затримок. Графічно ідея квантільного нормування наведена на рис. 2.

Перевірка узгодженості з ресурсами (коротко). Нехай інтервал руху $h = 20$ хв, час розвороту/відстою $t^{turn} = 10$ хв, резерв відновлення на кінцевій $s^{rec} = 5$ хв. Тоді цикловий час:

$$T_m^* = Q_T(0.90) = 60 + 1.2816 \cdot 6 \approx 67.7 \text{ хв.,}$$

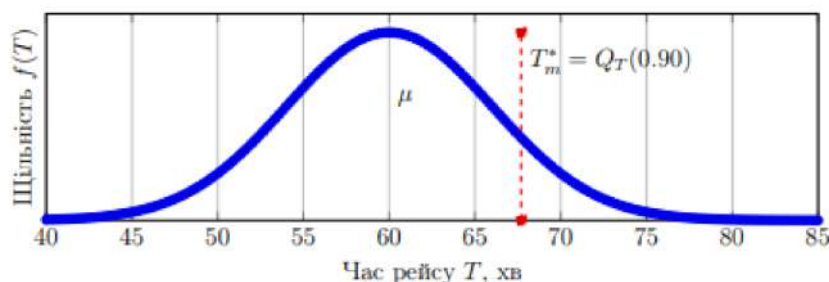


Рис. 2. Ілюстрація вибору нормативного часу рейсу за квантілем $p^* = 0.90$ (теоретичний експеримент)

а потреба в автобусах:

$$T_m^* = Q_T(0.90) = 60 + 1.2816 \cdot 6 \approx 67.7 \text{ хв.}$$

Якщо фактичний парк менший, можливі варіанти коригування: збільшити h , зменшити p^* (і відповідно резерв), або реалізувати заходи зменшення σ (пріоритет руху, оптимізація посадки) без погіршення сервісу.

Для заданих умов прикладу та цільової надійності $p^* = 0.90$ отримано нормативний час рейсу $T_m^* \approx 67.7$ хв. та оптимальну маршрутну швидкість $v_m^* = 37,2$ км/год для автобуса *Mercedes-Benz Tourismo*. Зміна умов руху (зростання σ) або вимог до надійності (зростання p^*) призведе до збільшення T_m^* та зменшення v_m^* , що повинно враховуватись при плануванні розкладу.

У роботі узагальнено та систематизовано сучасні підходи до визначення оптимальної маршрутної швидкості їздки при експлуатації автомобільних засобів транспорту в пасажирських перевезеннях, а також обґрунтовано вибір методики розрахунку нормативного часу рейсу та відповідної швидкості на основі ризик-орієнтованого (квантільного) нормування.

Показано, що практики детермінованого нормування швидкості за середніми значеннями є простими у застосуванні, однак методично недостатніми для умов високої варіативності міського/приміського руху: вони не враховують «хвости» розподілу часу рейсу, що призводить або до систематичних запізнь, або до надмірного резерву часу й зниження привабливості перевезень.

Обґрунтовано доцільність переходу до стохастичного опису часу рейсу та використання квантільного підходу як інструменту керування надійністю виконання розкладу. Критично важливим є те, що квантільне нормування саме по собі не усуває причини затримок і потребує паралельної декомпозиції складових часу поїздки та організаційних/інфраструктурних заходів.

Показано зв'язок між нормативним часом рейсу, оборотним часом, потребою у парку та експлуатаційними витратами, що дозволяє економічно інтерпретувати рішення щодо оптимальної швидкості як компроміс «надійність–ресурси–час пасажирів».

Наукова новизна отриманих результатів полягає у формалізації визначення оптимальної маршрутної швидкості через квантіль фактичного часу рейсу та вибір рівня надійності p^* із урахуванням сумарних втрат (запізнення + резерв часу), а також у поєднанні цього підходу з декомпозицією часу поїздки на компоненти T_{run} , T_{dwell} , T_{del} для підвищення інтерпретованості та керованості параметрів розкладу.

Практична цінність полягає у можливості впровадження методики на основі типових даних експлуатації (AVL/GPS, розклад, за наявності – дані пасажирообміну) з отриманням нормативів T_m^* і v_m^* для різних часових періодів. Запропонований підхід забезпечує прозоре налаштування «рівня сервісу» через параметр p^* , дозволяє обґрунтовано встановлювати резерв часу та оцінювати наслідки для потреби в парку й витрат.

Перспективними для досліджень у подальшому є: уточнення функції витрат для вибору p^* з урахуванням реальних штрафів/втрат та ефектів для ТОiP; перехід від припущень про форму розподілу T до робастних/непараметричних оцінок квантілей; інтеграція моделювання зупинок і перехресть у єдину схему причинного аналізу затримок; розширення методики на мережевий рівень із урахуванням міжмаршрутних взаємодій і стратегій оперативного керування регулярністю.

Висновки

У роботі розглянуто задачу визначення оптимальної маршрутної швидкості їздки при експлуатації автомобільних засобів транспорту в пасажирських перевезеннях за умов мінливості дорожньої ситуації та стохастичного характеру затримок. Показано, що використання лише середніх значень часу руху для нормування швидкості не забезпечує належного рівня пунктуальності та призводить до неефективного використання ресурсів у різні періоди доби.

Запропоновано даноорієнтований підхід, у якому оптимальна маршрутна швидкість визначається через нормативний час рейсу, обраний за квантілем фактичного часу поїздки з цільовою надійністю p^* , та узгоджується з ресурсними й економічними обмеженнями. Формалізовано вираз $v_m^* = L/T_m^* = L/Q_T(p^*)$, наведено інтерпретацію параметрів і можливість вибору p^* за критерієм мінімуму сумарних втрат (запізнення та резерв часу). Декомпозиція часу рейсу на складові руху, стоянок і затримок підвищує керованість нормативів і створює основу для практичних заходів з підвищення швидкості та надійності (пріоритет руху, оптимізація зупинок, поліпшення технології посадки).

Отримані результати мають практичну цінність для планування розкладів і резервів часу, підвищення регулярності руху та зниження експлуатаційних витрат; перспективи подальших досліджень пов'язані з робастними оцінками квантілей, уточненням функцій витрат і масштабуванням методики на рівень маршрутної мережі.

Список використаної літератури

1. Muweis J., Łamasz B. The development of the aviation fuel market in Poland and changes in civil passenger traffic. *Polityka Energetyczna*. 2019. Vol. 22, no. 1. P. 153–168. DOI: 10.33223/epj/105527
2. Li Y., Yang B., Cui Q. The effects of high-speed rail on air passenger transport in China. *Applied Economics Letters*. 2019. Vol. 26, no. 9. P. 745–749. DOI: 10.1080/13504851.2018.1494798

3. Zhang F., Ning Y., Lou X. The evolutionary mechanism of China's urban network from 1997 to 2015: An analysis of air passenger flows. *Cities*. 2021. Vol. 109. DOI: 10.1016/j.cities.2020.103005
4. Korkmaz E., Akgüngör A. P. The forecasting of air transport passenger demands in Turkey by using novel meta-heuristic algorithms. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2021. Vol. 33, no. 16. DOI: 10.1002/cpe.6263
5. Danchev S., Paratsiokas N., Vettas N. The impact of the concession of 14 regional Greek airports on passenger traffic. *Journal of Industry, Competition and Trade*. 2022. Vol. 22, no. 1. P. 51–67. DOI: 10.1007/s10842-021-00378-0
6. Al-Saad S., Ababneh A., Alazaizeh M. M. The influence of airport security procedures on the intention to re-travel. *European Journal of Tourism Research*. 2019. Vol. 23. P. 127–141.
7. Lee H.-S. The networkability of cities in the international air passenger flows 1992-2004. *Journal of Transport Geography*. 2009. Vol. 17, no. 3. P. 166–175. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2008.07.011
8. Ida Y. The pattern of air passenger flows in Japan. *Geographical Review of Japan, Series B*. 1993. Vol. 66, no. 1. P. 18–34. DOI: 10.4157/grj1984b.66.18
9. Correnti V., Capri S., Ignaccolo M., Inturri G. The potential of rotorcraft for intercity passenger transport. *Journal of Air Transport Management*. 2007. Vol. 13, no. 2. P. 53–60. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2006.11.009
10. Burns M. C., Roca Cladera J., Moix Bergadà M. The spatial implications of the functional proximity deriving from air passenger flows between European metropolitan urban regions. *GeoJournal*. 2008. Vol. 71, no. 1. P. 37–52. DOI: 10.1007/s10708-008-9144-x
11. Li H., Wang H., Bai M., Duan B. The structure and periodicity of the Chinese air passenger network. *Sustainability (Switzerland)*. 2019. Vol. 11, no. 1. DOI: 10.3390/su11010054
12. Elwakil O. S., Windle R. J., Dresner M. E. Transborder demand leakage and the US-Canadian air passenger market. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2013. Vol. 57. P. 45–57. DOI: 10.1016/j.tre.2013.01.005

References

1. Muweis, J., & Łamasz, B. (2019). The development of the aviation fuel market in Poland and changes in civil passenger traffic. *Polityka Energetyczna*, 22(1), 153-168. doi:10.33223/epj/105527
2. Li, Y., Yang, B., & Cui, Q. (2019). The effects of high-speed rail on air passenger transport in China. *Applied Economics Letters*, 26(9), 745-749. doi:10.1080/13504851.2018.1494798
3. Zhang, F., Ning, Y., & Lou, X. (2021). The evolutionary mechanism of China's urban network from 1997 to 2015: An analysis of air passenger flows. *Cities*, 109. doi:10.1016/j.cities.2020.103005
4. Korkmaz, E., & Akgüngör, A. P. (2021). The forecasting of air transport passenger demands in Turkey by using novel meta-heuristic algorithms. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 33(16). doi:10.1002/cpe.6263
5. Danchev, S., Paratsiokas, N., & Vettas, N. (2022). The impact of the concession of 14 regional Greek airports on passenger traffic. *Journal of Industry, Competition and Trade*, 22(1), 51-67. doi:10.1007/s10842-021-00378-0
6. Al-Saad, S., Ababneh, A., & Alazaizeh, M. M. (2019). The influence of airport security procedures on the intention to re-travel. *European Journal of Tourism Research*, 23, 127–141.
7. Lee, H.-S. (2009). The networkability of cities in the international air passenger flows 1992–2004. *Journal of Transport Geography*, 17(3), 166-175. doi:10.1016/j.jtrangeo.2008.07.011
8. Ida, Y. (1993). The pattern of air passenger flows in Japan. *Geographical Review of Japan, Series B*, 66(1), 18–34. doi:10.4157/grj1984b.66.18
9. Correnti, V., Capri, S., Ignaccolo, M., & Inturri, G. (2007). The potential of rotorcraft for intercity passenger transport. *Journal of Air Transport Management*, 13(2), 53–60. doi:10.1016/j.jairtraman.2006.11.009
10. Burns, M. C., Roca Cladera, J., & Moix Bergadà, M. (2008). The spatial implications of the functional proximity deriving from air passenger flows between European metropolitan urban regions. *GeoJournal*, 71(1), 37–52. doi:10.1007/s10708-008-9144-x
11. Li, H., Wang, H., Bai, M., & Duan, B. (2019). The structure and periodicity of the Chinese air passenger network. *Sustainability (Switzerland)*, 11(1). doi:10.3390/su11010054
12. Elwakil, O. S., Windle, R. J., & Dresner, M. E. (2013). Transborder demand leakage and the US-Canadian air passenger market. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 57, 45-57. doi:10.1016/j.tre.2013.01.005

Дата першого надходження статті до видання: 18.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

Р. М. ІГНАТЮК

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства
Національний університет водного господарства
та природокористування
ORCID: 0000-0002-1004-1469

О. С. СТАДНИК

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства
Національний університет водного господарства
та природокористування
ORCID: 0000-0001-5881-2413

О. П. РИЖИЙ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства
Національний університет водного господарства
та природокористування
ORCID: 0000-0002-8592-1217

Л. С. СЕРІЛКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри теоретичної механіки,
інженерної графіки та машинознавства
Національний університет водного господарства
та природокористування
ORCID: 0000-0002-2396-561X

В. Л. ПАХАРЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства
Національний університет водного господарства
та природокористування
ORCID: 0000-0002-9066-3806

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДВОМАСОВОГО МАХОВИКА В ТРАНСМІСІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Представлено результати комплексного дослідження доцільності застосування двомасового маховика в трансмісії електромобіля з урахуванням специфіки роботи електричного привода, характеристик силової установки та динамічних навантажень. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності використання електродвигунів, зменшення динамічних навантажень на трансмісію та покращення експлуатаційних характеристик транспортних засобів із електричними приводами. У роботі проаналізовано основні проблеми, пов'язані з роботою трансмісій електромобілів, та показано, що традиційні рішення з використанням жорстких з'єднань між електродвигуном і механічними елементами трансмісії можуть призводити до високочастотних коливань, що впливають на надійність і ресурс вузлів.

Основною метою дослідження є оцінка можливості та обґрунтування доцільності використання двомасового маховика для пом'якшення крутильних коливань, зниження пульсацій крутного моменту та підвищення загальної ефективності роботи трансмісії. Для цього проведено математичне моделювання динамічної взаємодії електродвигуна, двомасового маховика та навантаження в режимах прискорення та рекуперативного гальмування. Результати чисельного моделювання дозволили встановити закономірності впливу параметрів двомасового маховика на характеристики трансмісії, визначити оптимальні співвідношення мас та жорсткостей елементів маховика для забезпечення мінімізації коливань та оцінити потенційні вигоди його застосування.



Аналіз отриманих результатів показав, що використання двомасового маховика може забезпечити суттєве зменшення амплітуд крутильних коливань, зниження механічних навантажень на вузли трансмісії та підвищення комфорту руху електромобіля. Однак доцільність впровадження такої системи залежить від конкретних робочих умов, конструктивних обмежень, масогабаритних характеристик та економічної доцільності. Узагальнені висновки свідчать про наявність потенціалу для подальшого експериментального та прикладного дослідження, що може стати основою для оптимізації трансмісій сучасних електромобілів.

Ключові слова: двомасовий маховик, електромобіль, трансмісія, крутильні коливання, математичне моделювання.

R. M. IHNATIUK

PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automobiles
and Automotive Engineering
National University of Water and Environmental Engineering
ORCID: 0000-0002-1004-1469

O. S. STADNYK

PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automobiles
and Automotive Engineering
National University of Water and Environmental Engineering
ORCID: 0000-0001-5881-2413

O. P. RYZHYI

PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automobiles
and Automotive Engineering
National University of Water and Environmental Engineering
ORCID: 0000-0002-8592-1217

L. S. SERILKO

PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Theoretical Mechanics,
Engineering Graphics and Machine Science
National University of Water and Environmental Engineering
ORCID: 0000-0002-2396-561X

V. L. PAKHARENKO

PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automobiles
and Automotive Engineering
National University of Water and Environmental Engineering
ORCID: 0000-0002-4506-0096

ANALYSIS OF THE FEASIBILITY OF APPLYING A DUAL-MASS FLYWHEEL IN AN ELECTRIC VEHICLE TRANSMISSION

The paper presents the results of a comprehensive study on the feasibility of applying a dual-mass flywheel in an electric vehicle transmission, taking into account the specific operating characteristics of the electric drive, the powertrain parameters, and dynamic loading conditions. The relevance of the study is driven by the need to improve the efficiency of electric motor utilization, reduce dynamic loads acting on transmission components, and enhance the operational performance of vehicles equipped with electric drivetrains. The main issues associated with the operation of electric vehicle transmissions are analyzed, and it is shown that conventional solutions based on rigid mechanical connections between the electric motor and transmission elements may lead to high-frequency torsional vibrations, which adversely affect the reliability and service life of mechanical components.

The primary objective of this research is to assess the applicability and substantiate the feasibility of using a dual-mass flywheel to mitigate torsional vibrations, reduce torque pulsations, and improve the overall efficiency of transmission operation. To achieve this goal, mathematical modeling of the dynamic interaction between the electric motor, the dual-mass flywheel, and the load was carried out under acceleration and regenerative braking modes. The results of numerical simulations made it possible to identify the influence patterns of dual-mass flywheel parameters

on transmission performance, determine optimal mass and stiffness ratios of the flywheel elements to minimize vibration levels, and evaluate the potential benefits of its implementation.

The analysis of the obtained results demonstrates that the use of a dual-mass flywheel can provide a significant reduction in torsional vibration amplitudes, decrease mechanical loads on transmission components, and improve driving comfort in electric vehicles. However, the feasibility of implementing such a system depends on specific operating conditions, design constraints, mass-and-size limitations, and economic considerations. The generalized conclusions indicate the existence of substantial potential for further experimental and applied research, which may serve as a basis for optimizing the transmissions of modern electric vehicles.

Key words: dual-mass flywheel, electric vehicle, transmission, torsional vibrations, mathematical modeling.

Постановка проблеми

Розвиток автомобільної техніки протягом понад століття супроводжується безперервним удосконаленням силових установок і трансмісій з метою підвищення надійності, комфорту, енергоефективності та зниження шкідливого впливу на довкілля. Історичний аналіз еволюції приводів і зчеплень свідчить, що ключовою проблемою механічних систем завжди залишалися коливальні процеси, нерівномірність передачі крутного моменту та динамічні навантаження, які негативно впливають на довговічність агрегатів і плавність руху транспортного засобу.

На ранніх етапах розвитку автомобілів парові та електричні приводи мали суттєву перевагу завдяки майже рівномірній характеристиці крутного моменту, що дозволяло обходитися без складних механізмів зчеплення та трансмісії. Водночас двигуни внутрішнього згоряння, через специфічний характер роботи, вимагали застосування зчеплення та додаткових елементів для компенсації нерівномірності обертання і забезпечення прийняттого рівня комфорту. Зі зростанням потужності двигунів і ускладненням трансмісій це призвело до появи нових конструктивних рішень, серед яких важливе місце посіли демпфувальні маховики.

Незважаючи на те, що електродвигуни сучасних електромобілів забезпечують високий пусковий крутний момент і значно рівномірнішу роботу порівняно з ДВЗ, проблема крутильних коливань не втратила своєї актуальності. Дослідження показують, що імпульсний характер електромагнітного моменту, робота силових електроніки, а також режими рекуперативного гальмування призводять до виникнення динамічних навантажень у трансмісії електромобіля. Ці коливання передаються на редуктор, вали та підвіску, що може спричинити підвищений рівень шуму, вібрацій і зниження ресурсу механічних компонентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі, присвяченій дослідженню демпфувальних властивостей двомасового маховика (ДММ) методом моделювання та мультирежимних чисельних випробувань, показано, що правильно налаштований ДММ здатен знижувати амплітуди крутильних коливань у широкому спектрі робочих режимів і підвищувати характеристики трансмісії [1]. Робота автора [2] показує, що двоінерційні маховикові системи можуть не лише гасити високочастотні пульсації, а й слугувати проміжним буфером потужності для зменшення пікових навантажень на батарею під час прискорень та рекуперації. Це відкриває додаткову перспективу поєднання демпфування та енергетичного накопичення в електромобільних силових установках. У дослідженні з оптимізації параметрів двомасового маховика показано методи багатокритеріальної оптимізації. Автори [3] доводять, що впровадження оптимізованих демпферів (наприклад, з додатковими поглиначами чи регульованою жорсткістю) дозволяє суттєво поліпшити ізоляцію коливань без значного збільшення маси системи.

Практичний аналіз впливу інтенсивності прискорення на елементи двомасового маховика та навантаження трансмісії демонструє, що режими сильного прискорення зростають пікові навантаження на пружні елементи ДММ і потребують їх підсилення або оптимізації конфігурації. Робота авторів [4] дає рекомендації з підбору параметрів для реальних автомобільних сценаріїв. Роботи [5, 6] з моделювання та аналізу динаміки двомасових маховиків систематизують підходи до математичного опису ДММ, включаючи нелінійні характеристики пружин-демпферів і вплив електроніки привода на пульсації моменту. Ці дослідження підкреслюють необхідність адаптації класичних ДММ-рішень під специфіку електродвигунів.

Публікація [7] з активного управління крутильними коливаннями показує, що при наявності високопродуктивних алгоритмів керування моментом електродвигуна можна частково компенсувати потребу у великих механічних демпферних пристроях, однак в багатоступінчастих трансмісіях поєднання активного контролю та механічного ДММ дає найкращий компроміс між масою, вартістю і показниками акустично-вібраційного контролю електромобіля.

Індустріальні документи та технічні прес-релізи виробників трансмісій [8] констатують, що ДММ залишається одним із найефективніших механічних рішень для ізоляції крутильних коливань у трансмісіях різного ступеня складності, але при цьому підкреслюють питання сумісності з електричними приводами та масо-габаритні обмеження.

У науковій роботі [9] зазначається, що застосування двомасових маховиків дозволяє ефективно зменшити амплітуду крутильних коливань, ізолювати трансмісію від імпульсних навантажень та підвищити акустичний комфорт транспортного засобу. Для електромобілів це особливо важливо, оскільки відсутність шуму двигуна

внутрішнього згоряння робить вібрації трансмісії більш помітними для водія та пасажирів. Крім того, зменшення динамічних навантажень сприяє підвищенню довговічності редуктора та елементів приводу коліс, що є критичним з огляду на високий миттєвий крутний момент електродвигунів.

Актуальність дослідження та впровадження двомасових маховиків у конструкцію сучасних електромобілів підтверджується також сучасними тенденціями розвитку електричного транспорту, орієнтованими на підвищення енергоефективності, зниження маси та покращення експлуатаційних показників. У роботі [10] підкреслюється, що оптимізовані демпфувальні системи в електроприводах дозволяють не лише знизити механічні втрати, а й підвищити плавність керування тяговим моментом, що позитивно впливає на загальну ефективність електромобіля.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є обґрунтування доцільності використання двомасового маховика у трансмісії сучасного електромобіля, а також дослідження його впливу на крутильні коливання, вібронавантаженість і експлуатаційні показники електроприводу з урахуванням специфіки роботи тягового електродвигуна та силової електроніки.

Викладення основного матеріалу дослідження

Двомасовий маховик може бути застосований не в усіх архітектурах приводу електромобіля, оскільки його функція пов'язана з наявністю механічного ланцюга передачі крутного моменту та потребою демпфування крутильних коливань.

Стрімкий розвиток електромобільного транспорту зумовив суттєві зміни у підходах до проєктування силових установок і трансмісій. Тривалий час домінувала концепція електропривода з одноступінчастим редуктором, що пояснювалося високим пусковим крутним моментом електродвигуна та широким діапазоном його ефективної роботи. Проте зростання вимог до динамічних характеристик, максимальної швидкості, енергоефективності та акустичного комфорту призвело до повернення інтересу до багатоступінчастих трансмісій у електромобілях.

У сучасних наукових і прикладних дослідженнях [11] дедалі частіше розглядаються дво-, три- та багатоступінчасті коробки передач для електричних силових установок, зокрема у поєднанні з двома зчепленнями або синхронізаторами. Типові архітектури таких приводів наведено на рис. 1, де показано одноступінчастий електропривод, а також дво-, три- та чотириступінчасті трансмісії з різним рівнем конструктивної складності.

Наведені схеми не є суто теоретичними, вони реалізовані або випробувані на реальних серійних електромобілях та експериментальних прототипах.

Разом з ускладненням механічної частини електропривода актуалізується проблема крутильних коливань, ударних навантажень і шумів, які в умовах відсутності двигуна внутрішнього згоряння стають домінуючими чинниками комфорту та довговічності. Саме в цьому контексті доцільним є аналіз можливостей застосування двомасових маховиків – елементів, які традиційно використовуються в трансмісіях автомобілів з ДВЗ, але наразі розглядаються як перспективний засіб демпфування крутильних коливань в електромобілях.

Архітектура одноступінчастого електроприводу, показана на рис. 1, а, являє собою електропривід з одним редуктором, диференціалом та півосями. Така схема тривалий час вважалася оптимальною для електромобілів масового сегмента завдяки простоті, високій надійності та мінімальній кількості механічних вузлів. Саме цей підхід реалізований у більшості серійних електромобілів початкового та середнього класу (Tesla Model 3, Leaf та інші). Водночас обмеження одноступінчастого редуктора стають очевидними зі зростанням потужності електродвигуна та вимог до максимальної швидкості. Для забезпечення прийнятної динаміки на низьких швидкостях і високої ефективності на крейсерських режимах доводиться йти на компроміс у виборі передатного числа, що негативно впливає на загальний ККД силової установки.

З точки зору обертових коливань одноступінчастий привід є найбільш нейтральним, оскільки має мінімальну кількість валів і зубчастих пар. Саме тому застосування двомасових маховиків у таких системах практично не розглядається і вважається недоцільним.

На схемі рис. 1, б, наведена двоступінчастий електропривід з двома зчепленнями або керованим механізмом перемикання передач. Така архітектура вже знайшла практичне застосування у серійних електромобілях високого класу. Найбільш відомим прикладом є використання двоступінчастої коробки передач на задній осі у спортивних електромобілях преміум-сегмента (Porsche Taycan, Audi e-tron GT, Lucid Air).

Перша передача в такій системі забезпечує максимальний крутний момент на колесах під час рушання та інтенсивного розгону, тоді як друга передача оптимізована для руху з високою швидкістю і зниження втрат у редукторі. Результатом є покращення динаміки та підвищення енергоефективності в широкому діапазоні швидкостей.

Однак поява другої передачі принципово змінює динаміку трансмісії. Під час перемикання передач виникають короткочасні розриви або стрибки крутного моменту, що призводить до збудження крутильних коливань у валах, зубчастих передачах і диференціалі. У класичних автомобілях з ДВЗ ці коливання частково маскуються шумом і вібраціями двигуна, тоді як в електромобілях вони стають значно більш помітними. Саме в таких архітектурах застосування двомасового маховика між електродвигуном і трансмісією є технічно обґрунтованим. Двомасовий маховик дозволяє відокремити інерцію ротора електродвигуна від інерції трансмісії, зменшити пікові навантаження під час перемикань передач і підвищити акустичний комфорт.

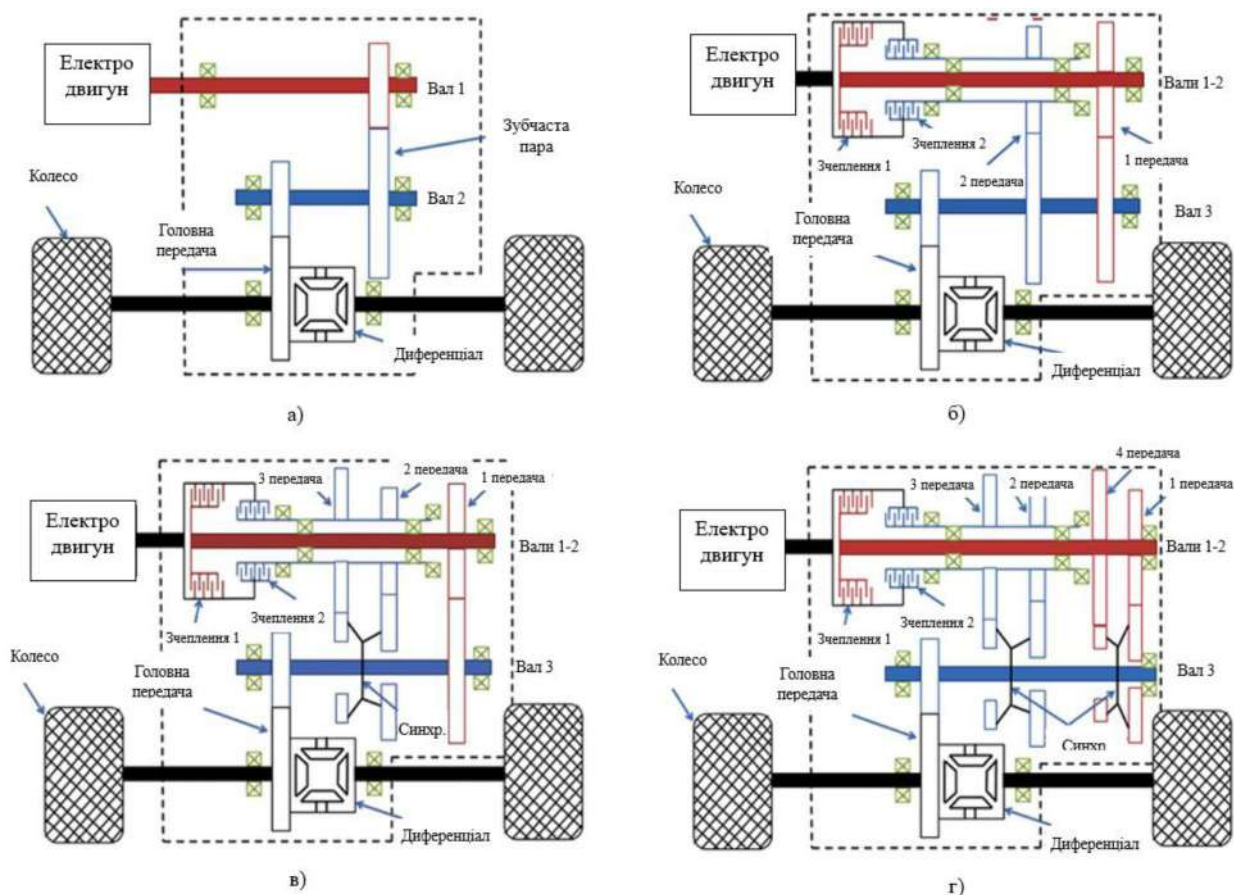


Рис. 1. Різновиди силової архітектури електромобіля [11]

Архітектура, показана на рис. 1, в, являє собою триступінчасту трансмісію з синхронізатором та двома зчепленнями. Подібні рішення застосовувалися або випробовувалися у високопродуктивних електромобілях і експериментальних прототипах, орієнтованих на досягнення максимальних динамічних характеристик.

Збільшення кількості передач дозволяє ще точніше підтримувати роботу електродвигуна в зоні максимального ККД, однак одночасно призводить до різкого зростання механічної складності привода. Кількість валів, зубчастих пар і зчеплень зростає, що неминує підвищує рівень крутильних коливань і динамічних навантажень.

У таких системах без ефективного демпфування коливань значно знижується ресурс трансмісії, ускладнюється керування перемиканням передач і погіршується комфорт руху. Саме тому триступінчасті електроприводи є одними з найбільш перспективних кандидатів для інтеграції двомасових маховиків, які можуть виконувати роль механічного фільтра високочастотних і низькочастотних коливань.

Схема на рис. 1, г, демонструє чотириступінчасту трансмісію з синхронізатором, яка наразі розглядається переважно в дослідних розробках і прототипах (розробки та прототипи ZF, Magna, Stellantis). Подібні рішення пропонуються для електричних спортивних автомобілів, важких електромобілів та комерційного транспорту. У таких архітектурах динамічні навантаження набувають особливої гостроти. Часті перемикання передач, високі миттєві крутні моменти електродвигунів і режими рекуперативного гальмування створюють складний спектр крутильних збурень. Без застосування спеціальних демпфувальних елементів забезпечити прийнятний рівень надійності та комфорту практично неможливо.

Двомасовий маховик у багаступінчастому електроприводі може розглядатися як ключовий елемент, що забезпечує узгодження електричної та механічної частин силової установки.

Відповідно до архітектур багаступінчастих електроприводів (рис. 1, б–г), двомасовий маховик доцільно встановлювати між електричним двигуном та вхідним валом трансмісії, рис. 2.

У роботі розглядається електромобіль з централізованим електричним двигуном та двоступінчастою механічною трансмісією, аналогічною тій, що застосовується в сучасних високопродуктивних електромобілях (типу Porsche Taycan або Audi RS e-tron GT).

У даних серійних електромобілях двомасовий маховик у класичному розумінні не застосовується. Демпфування крутильних коливань у цих силових установках реалізовано за рахунок оптимізованої конструкції редуктора, пружних елементів трансмісії та керування електромагнітним моментом електродвигуна. Водночас наявність

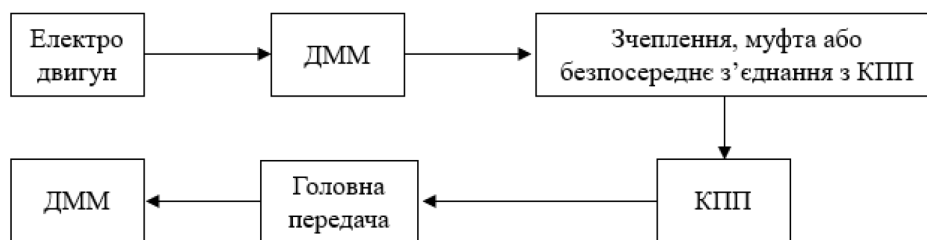


Рис. 2. Схема розміщення ДММ в трансмісії електромобіля

двоступінчастої коробки передач і високих миттєвих крутних моментів створює передумови для виникнення значних динамічних навантажень, що обґрунтовує доцільність дослідження альтернативних або додаткових механічних демпфувальних рішень, зокрема двомасового маховика, у перспективних електроприводах.

З метою зменшення крутильних коливань і динамічних навантажень у трансмісії між електричним двигуном і коробкою передач нами пропонується встановити двомасовий маховик, рис. 2.

У запропонованій моделі двомасовий маховик встановлюється між електричним двигуном та двоступінчастою коробкою передач, що дозволяє демпфувати крутильні коливання, які виникають:

- під час перемикання передач;
- при різких змінах електромагнітного моменту;
- у режимах рекуперативного гальмування.

Аналіз наукових публікацій, присвячених дослідженню крутильних коливань у трансмісіях з двомасовим маховиком, свідчить, що переважна більшість робіт базується на багатомасових динамічних моделях, побудованих на основі другого закону Ньютона. Зокрема, у роботі, присвяченій аналізу процесів коливань у трансмісії автомобіля під час рушання з місця, використано шестиступеневу крутильну модель, яка включає двигун внутрішнього згорання, дві маси двомасового маховика, зчеплення, зубчасту пару коробки передач і приведену масу автомобіля [4].

Аналогічний математичний каркас використано і в роботі [5], де досліджуються демпфувальні властивості двомасового маховика в різних режимах руху транспортного засобу. Автори застосували шестиступеневу модель трансмісії з урахуванням нелінійних характеристик пружних і демпфувальних елементів ДММ, а також розглянули кілька експлуатаційних сценаріїв, включаючи пуск, розгін і зміну навантаження.

Спільною рисою зазначених робіт є використання однакової структурної схеми математичної моделі, у якій кожен елемент трансмісії представлений у вигляді зосередженої інерційної маси, а взаємодія між ними описується пружно-демпфувальними зв'язками. Рівняння руху формуються через різниці кутових переміщень і швидкостей, що дозволяє адекватно описати крутильні коливання та динамічні навантаження в трансмісії. Водночас відмінності між цими дослідженнями полягають у постановці задачі та глибині врахування нелінійних ефектів: у роботі [4] основний акцент зроблено на аналізі перехідного процесу рушання, тоді як у [5] – на оцінці демпфувальних властивостей двомасового маховика за різних умов експлуатації.

Водночас слід зазначити, що більшість наведених досліджень орієнтовані на трансмісії автомобілів з двигунами внутрішнього згорання або гібридні конфігурації, у яких зчеплення є конструктивно необхідним елементом. Для електромобілів така постановка задачі не завжди є виправданою, оскільки електричний двигун забезпечує керований пуск без розриву силового потоку, а потреба у зчепленні відсутня або суттєво зменшена. У цьому випадку включення зчеплення до математичної моделі призводить до ускладнення системи рівнянь без істотного впливу на результати аналізу крутильних коливань.

З огляду на викладене, актуальним є застосування п'ятиступеневої моделі трансмісії для електромобілів, у якій виключено зчеплення як елемент, не притаманний електричному приводу. Така модель є логічною адаптацією класичних підходів, широко застосовуваних у дослідженнях двомасових маховиків, і водночас краще відповідає конструктивним та експлуатаційним особливостям електромобілів. Використання п'ятиступеневої моделі дозволяє зосередитись на ключових фізичних процесах – взаємодії електричного двигуна, двомасового маховика та трансмісії, і створює методично обґрунтовану основу для подальших досліджень доцільності застосування ДММ у сучасних електромобілях.

Рівняння для електричного двигуна та первинної маси ДММ матиме вигляд:

$$J_1 \ddot{\theta}_1 = T_e - k_1 (\theta_1 - \theta_2) - c_1 (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2), \quad (1)$$

де $T_1(t)$ – електромагнітний крутний момент електричного двигуна; J_1 – момент інерції електричного двигуна та первинної маси ДММ; θ_1 – кутове переміщення ротора електричного двигуна разом із первинною масою ДММ; θ_2 – кутове переміщення вторинної маси ДММ; k_1 – крутильна жорсткість ДММ; c_1 – коефіцієнт демпфування ДММ.

Дане рівняння описує баланс моментів на роторі електродвигуна, який безпосередньо з'єднаний з первинною масою ДММ.

Наступне рівняння відповідає підходу автора [5], але без урахування зчеплення, що відповідає специфіці електромобіля. Вторинна маса ДММ описується наступною формулою:

$$J_2 \ddot{\theta}_2 = k_1 (\theta_1 - \theta_2) + c_1 (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) - k_2 (\theta_2 - \theta_3) - c_2 (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3), \quad (2)$$

де J_2 – момент інерції вторинної маси ДММ; θ_3 – кутове переміщення вхідного вала КПП; k_2 – крутильна жорсткість вхідного вала КПП; c_2 – коефіцієнт демпфування вхідного вала.

Рівняння 3 описує крутильну динаміку проміжного вузла між ДММ і вихідним валом трансмісії, тобто як вхідний вал КПП реагує на момент від ДММ і передає його далі.

$$J_3 \ddot{\theta}_3 = k_2 (\theta_2 - \theta_3) + c_2 (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3) - k_3 (\theta_3 - \theta_4) - c_3 (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4), \quad (3)$$

де J_3 – момент інерції вхідного вала КПП; θ_4 – кутове переміщення вихідного вала трансмісії та диференціала; k_3 – крутильна жорсткість коробки передач; c_3 – коефіцієнт демпфування КПП.

Наступне рівняння описує динаміку крутильного руху диференціала, який з'єднує коробку передач із колесами.

$$J_4 \ddot{\theta}_4 = k_3 (\theta_3 - \theta_4) + c_3 (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4) - k_4 (\theta_4 - \theta_5) - c_4 (\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_5), \quad (4)$$

де J_4 – момент інерції вихідного вала та диференціала; θ_5 – приведені кутові переміщення коліс і маси електромобіля; k_4 – крутильна жорсткість приводу коліс; c_4 – коефіцієнт демпфування приводу коліс.

Рівняння 5 описує крутильну динаміку приводу коліс та реакцію маси електромобіля на переданий крутний момент.

$$J_5 \ddot{\theta}_5 = k_4 (\theta_4 - \theta_5) + c_4 (\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_5) - C_x \theta_5, \quad (5)$$

де J_5 – приведений момент інерції електромобіля; C_x – приведений коефіцієнт опору руху електромобіля, що враховує опір коченню та аеродинамічний опір.

За аналогією до багаторежимного підходу, використаного в роботі [5], електричний двигун у даній роботі розглядається як кероване джерело крутного моменту. В математичній моделі двигун задає крутний момент безпосередньо на вал трансмісії відповідно до заданого закону керування, без детального моделювання його електричної частини. Такий підхід дозволяє досліджувати вплив змінного крутного моменту на крутильні коливання трансмісії та ефективність двомасового маховика в різних режимах руху електромобіля.

$$T_e(t) = T_k(t) + \Delta T(t), \quad (6)$$

де $T_k(t)$ – заданий момент керування; $\Delta T(t)$ – пульсації моменту, зумовлені інвертором та електромагнітними гармоніками.

Запропонована п'яти степенева модель є логічною адаптацією моделі з роботи [4, 5] та зберігає її ключові переваги, зокрема можливість багаторежимного моделювання. Одночасно вона узгоджується з підходом аналізу перехідних процесів, застосованим у роботі [2], і краще відповідає конструктивним особливостям електромобілів.

Висновки

Проведений аналіз конструктивних схем електромобільних силових установок показав, що застосування двомасового маховика є доцільним не для всіх архітектур електропривода. В одноступінчастих трансмісіях, які мають мінімальну кількість механічних ланок і порівняно низький рівень крутильних збурень, використання двомасового маховика є технічно та економічно недоцільним.

Встановлено, що у багаступінчастих електричних трансмісіях (двоступінчастих і більше), особливо в системах з високими миттєвими крутними моментами та режимами частих перемикань передач, виникають значні крутильні коливання і пікові динамічні навантаження, які негативно впливають на довговічність елементів трансмісії та акустичний комфорт електромобіля. Саме для таких архітектур застосування двомасового маховика є конструктивно обґрунтованим.

Розроблена п'ятиступенева математична модель трансмісії електромобіля з двомасовим маховиком, адаптована до специфіки електричного приводу шляхом виключення зчеплення, дозволяє адекватно описувати крутильні коливання та динамічні навантаження в характерних експлуатаційних режимах, зокрема під час рухання з місця, інтенсивного розгону та рекуперативного гальмування.

Результати чисельного моделювання підтверджують, що введення двомасового маховика між електродвигуном і коробкою передач сприяє зменшенню амплітуд крутильних коливань, зниженню пікових навантажень у валах і зубчастих передачах, а також покращенню акустично-вібраційних показників трансмісії. Це створює передумови для підвищення ресурсу механічних вузлів та стабільності роботи електропривода.

Водночас встановлено, що доцільність застосування двомасового маховика в електромобілях суттєво залежить від конструктивних і експлуатаційних чинників, зокрема масо-габаритних обмежень, параметрів силової

електроніки, алгоритмів керування електромагнітним моментом та економічної ефективності впровадження. За відсутності оптимізації цих факторів механічне демпфування може бути частково або повністю замінено активними методами керування моментом.

Узагальнюючи результати дослідження, можна зробити висновок, що застосування двомасового маховика в трансмісіях електромобілів є доцільним переважно для високопродуктивних багатоступінчастих електроприводів, де вимоги до динаміки, комфорту та довговічності перевищують обмеження, пов'язані зі збільшенням маси та конструктивної складності. Отримані результати можуть бути використані як методична основа для подальших експериментальних досліджень та оптимізації перспективних електромобільних трансмісій.

Список використаної літератури

1. L. Chen, W. Shi, Z. Chen. Research on damping performance of dual mass flywheel based on vehicle transmission system modeling and multi-condition simulation. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 28064–28077. <https://doi.org/10.3390/app12157439>
2. A. Mehraban. Dual-inertia flywheel energy storage system for electric vehicles. *IET Electric Power Applications*. 2024. Vol. 18. Is. 10. P. 1370–1381 <https://doi.org/10.1049/elp2.12485>
3. H. J. Lee, J. K. Shim, Multi-objective optimization of a dual mass flywheel with centrifugal pendulum vibration absorbers in a single-shaft parallel hybrid electric vehicle powertrain for torsional vibration reduction. *Mechanical systems and signal processing*. 2022. Vol. 163, P. 108–152 <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108152>
4. B. Kindratsky, R. Litvin, O. Osmak, Influence of vehicle acceleration intensity on dual-mass flywheel elements and transmission load. *Transport technologies*. 2022 Vol. 3. № 1. P. 65–76 <https://doi.org/10.23939/tt2022.01.065>
5. L. Chen, W. Shi, Z. Chen. Modeling and experimental study on dynamic characteristics of dual-mass flywheel torsional damper. *Shock and vibration*. 2019. Vol. 2019, 13 pages. <https://doi.org/10.1155/2019/5808279>
6. H. Niu, L. Zeng, C. Wei, Z. Wan. Electromagnetic field and variable inertia analysis of a dual mass flywheel based on electromagnetic control. *Symmetry*. 2024. Vol. 16. № 9, 18 pages. <https://doi.org/10.3390/sym16091234>
7. S. Chen, M. Hu, Active torsional vibration suppression of integrated electric drive system based on optimal harmonic current instruction analytic calculation method. Available at SSRN. 2024. 20 pages <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4155241>
8. ZF Friedrichshafen AG. Dual-mass flywheel solutions for advanced vehicle drivetrains. ZF Press Release, 2022. Available at: <https://www.zf.com> (accessed: 2022).
9. H. Heisler. Advanced vehicle technology. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002. ISBN: 978-0750651318 <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5131-8.X5000-3>
10. K. Horváth, A. Zelei. Simulating noise, vibration, and harshness advances in electric vehicle powertrains: strategies and challenges. *World electric vehicle journal*. 2024. Vol. 15. № 8, 367 p <https://doi.org/10.3390/wevj15080367>
11. J. Ruan, P. Walker, J. Wu, N. Zhang, B. Zhang. Development of continuously variable transmission and multi-speed dualclutch transmission for pure electric vehicle. *Advances in mechanical engineering* 2018. Vol. 10(2) P. 1–15 <https://doi.org/10.1177/1687814018758223>

References

1. Chen, L., Shi, W., Chen, Z. (2020). Research on damping performance of dual mass flywheel based on vehicle transmission system modeling and multi-condition simulation. *IEEE Access*, 8, 28064–28077. <https://doi.org/10.3390/app12157439>
2. Mehraban A. (2024). Dual-inertia flywheel energy storage system for electric vehicles. *Energy Storage* 6 (1). <https://doi.org/10.1049/elp2.12485>
3. Lee H. J., Shim J. K. (2022). Multi-objective optimization of a dual mass flywheel with centrifugal pendulum vibration absorbers in a single-shaft parallel hybrid electric vehicle powertrain for torsional vibration reduction. *Mechanical Systems and Signal Processing* 163, 108–152 <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108152>
4. Kindratsky B., Litvin R., Osmak O. (2022). Influence of vehicle acceleration intensity on dual-mass flywheel elements and transmission load. *Transport Technologies*, vol. 3, no. 1, pp. 65–76, 2022, <https://doi.org/10.23939/tt2022.01.065>
5. L. Chen, W. Shi, Z. Chen. Modeling and experimental study on dynamic characteristics of dual-mass flywheel torsional damper. *Shock and vibration*, vol. 2019, Article ID 5808279, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5808279>
6. H. Niu, L. Zeng, C. Wei, Z. Wan. electromagnetic field and variable inertia analysis of a dual mass flywheel based on electromagnetic control. *Symmetry*, vol. 16, № 9, 1234, 2024. <https://doi.org/10.3390/sym16091234>
7. Chen S., Hu M. (2022). Active torsional vibration suppression of integrated electric drive system based on optimal harmonic current instruction analytic calculation method. *SSRN* <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4155241>
8. ZF Friedrichshafen AG. Dual-mass flywheel solutions for advanced vehicle drivetrains. ZF Press Release. Available at: <https://www.zf.com> (accessed: 2022).

9. Heisler H. (2002) Advanced vehicle technology. Butterworth-Heinemann, Oxford. ISBN: 978-0750651318. pp. 654 <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5131-8.X5000-3>
10. Horváth K., Zelei A. (2024). Simulating noise, vibration, and harshness advances in electric vehicle powertrains: strategies and challenges. *World Electric Vehicle Journal*, 15(8), p.367. <https://doi.org/10.3390/wevj15080367>
11. Ruan Jiageng, Walker Paul D, Wu Jinglai, Zhang Nong and Zhang Bangji. (2018) Development of continuously variable transmission and multi-speed dualclutch transmission for pure electric vehicle. *Advances In Mechanical Engineering* 10(2) 1–15 <https://doi.org/10.1177/1687814018758223>

Дата першого надходження статті до видання: 08.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

О. В. ІЩЕНКО

доктор технічних наук,
професор кафедри промислової фармації
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-9510-6005

І. В. ОХРІМЕНКО

аспірант кафедри хімічної технології та ресурсозбереження
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0009-0002-4338-8917

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІДРОГЕЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ЖЕЛАТИНУ ДЛЯ ТРАНСДЕРМАЛЬНИХ СИСТЕМ ДОСТАВКИ ЛІКІВ

Метою роботи є розробка та дослідження властивостей гідрогелевих матеріалів на основі желатину, полівінілового спирту та гіалуронової кислоти (Желатин/ПВС/НА), які поєднують у собі високу механічну міцність, оптимальну пористість та здатність забезпечувати ефективне дифузійне вивільнення лікарських засобів у трансдермальних системах доставки.

У роботі досліджено реологічні, структурні та сорбційні властивості гідрогелевих плівок на основі композицій желатин/полівініловий спирт, модифікованих гіалуроновою кислотою, жишмих глутаровим альдегідом, з метою оцінки їх придатності для використання як матриць трансдермальних терапевтичних систем. Реологічні дослідження показали, що всі досліджувані системи проявляють неньютонівську псевдопластичну поведінку, характерну для полімерних композицій. Зі збільшенням швидкості зсуву спостерігається зниження в'язкості, що зумовлено руйнуванням міжмолекулярних взаємодій та частковою дезорганізацією полімерної сітки. Базові композиції желатин/ПВС характеризуються найнижчими значеннями в'язкості, тоді як введення НА призводить до її зростання пропорційно концентрації, особливо в області малих швидкостей зсуву.

Визначення гелевої фракції показало, що додавання гіалуронової кислоти знижує ступінь жишвання гідрогелів: при вмісті 0,5 мас.% НА гелева фракція зменшується на 3–5 %, а при 1,0 мас.% – на 8–10 %, що пов'язано з вимиванням незжишмих НА. Дослідження кінетики набрякання у фосфатно-буферному розчині (рН 7,4) виявило значне підвищення рівноважного ступеня набухання при введенні НА. Композиції з 0,5 % НА демонструють оптимальне поєднання високої гідрофільності та структурної стабільності, тоді як при 1 % НА спостерігається надмірне набухання (> 700 %) і зниження механічної міцності. Отримані результати свідчать про перспективність гідрогелів желатин/ПВС/НА з контрольованим вмістом гіалуронової кислоти для застосування у трансдермальних терапевтичних системах.

Ключові слова: желатин, полівініловий спирт, гіалуронова кислота, гідрогелі, полімерні композиції, гідрогеліві матеріали.

O. V. ISHCENKO

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0002-9510-6005

I. V. OKHRIMENKO

Postgraduate Student at the Department of Chemical Technologies
and Resource Saving
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0009-0002-4338-8917



DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE PROPERTIES OF GELATIN-BASED HYDROGEL MATERIALS FOR TRANSDERMAL DRUG DELIVERY SYSTEMS

The aim of the work is to develop and study the properties of hydrogel materials based on gelatin, polyvinyl alcohol and hyaluronic acid (Gelatin/PVA/HA), which combine high mechanical strength, optimal porosity and the ability to provide effective diffusion release of drugs in transdermal delivery systems.

The work aims to develop and study the properties of hydrogel materials based on gelatin, polyvinyl alcohol, and hyaluronic acid (Gelatin/PVA/HA), which combine high mechanical strength, optimal porosity, and the ability to provide effective drug diffusion and release in transdermal delivery systems.

The work investigates the rheological, structural, and sorption properties of hydrogel films composed of gelatin/polyvinyl alcohol modified with hyaluronic acid and crosslinked with glutaraldehyde, to assess their suitability as matrices for transdermal therapeutic systems. Rheological studies have shown that all the systems studied exhibit non-Newtonian pseudoplastic behaviour characteristic of polymer compositions. With an increase in shear rate, viscosity decreases due to the destruction of intermolecular interactions and partial disorganisation of the polymer network. The elemental gelatin/PVA compositions exhibit the lowest viscosity values. At the same time, the introduction of HA leads to an increase in proportion to the concentration, especially in the low shear rate range.

Determination of the gel fraction showed that the addition of hyaluronic acid reduces the degree of cross-linking of hydrogels: at a content of 0.5 wt.% HA, the gel fraction decreases by 3–5 % and by 8–10 % at 1.0 wt.%, which is associated with the leaching of uncrosslinked HA. A study of the kinetics of swelling in a phosphate buffer solution (pH 7.4) revealed a significant increase in the equilibrium degree of swelling when HA was added. Compositions with 0.5 % HA exhibit an optimal balance of high hydrophilicity and structural stability, whereas at 1 % HA, excessive swelling (>700 %) and a decrease in mechanical strength are observed. The results obtained indicate the promise of gelatin/PVA/HA hydrogels with controlled hyaluronic acid content for use in transdermal therapeutic systems.

Key words: gelatin, polyvinyl alcohol, hyaluronic acid, hydrogels, polymer compositions, hydrogel materials.

Постановка проблеми

Гідрогелі – це тривимірні зшиті полімерні сітки з високопористою та гідратованою структурою, які вже тривалий час привертають увагу вчених завдяки своїй здатності утримувати або вивільняти різні речовини [1]. Завдяки унікальній функціональності, біосумісності, здатності до зворотнього набухання та чутливості до зовнішніх факторів, вони можуть вирішувати складні біомедичні завдання [2,3]. Сучасна класифікація гідрогелів базується на їхньому походженні, методах підготовки, фізико-хімічних характеристиках та швидкості біорозкладу, що дозволяє розробляти матеріали з контрольованими властивостями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Особливий інтерес становлять гідрогелі, які поєднують природні та синтетичні полімери. У той час як синтетичні полімери забезпечують високі механічні та хімічні характеристики, природні полімери цінуються за їхню нетоксичність, відсутність імунної відповіді та біосумісність [4]. Саме тому природні полімери сьогодні є предметом досліджень у всьому світі. Зокрема, желатин став одним із найпопулярніших компонентів для біомедичних гідрогелів завдяки наявності груп, що полегшують процес зшивання, та здатності імітувати позаклітинний матрикс. Застосування желатинових гідрогелів у фармації базується на їхній здатності виступати в ролі «розумного» контейнера. Завдяки наявності багатьох функціональних груп ($-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{OH}$), желатин може не лише утримувати лікарські речовини, але й вивільняти їх у відповідь на певні сигнали організму.

Гідрогелі на основі желатину є одними з найбільш перспективних біоматеріалів завдяки їхній високій біосумісності та здатності до біодеградації. Оскільки желатин отримують шляхом гідролізу колагену, він зберігає ключові біологічні сигнали, які сприяють адгезії клітин.

Желатин типу А – має позитивний заряд при нейтральному рН. Краще підходить для взаємодії з негативно зарядженими молекулами. Ізоелектрична точка – 7.0–9.0.

Желатин типу В – має негативний заряд при нейтральному рН. Часто використовується для створення комплексів з хітозаном або іншими полікатионами. Ізоелектрична точка – 4.7–5.2 [5].

Вивільнення активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ) із желатинової матриці відбувається зазвичай з комбінацією процесів – дифузії, набухання та біодеградації. АФІ вивільнюється через пори гідрогелю, де швидкість залежить від щільності зшивки. При потраплянні у воду структура гелю розширюється, відстань між ланцюгами збільшується, що також покращує вивільнення АФІ. Оскільки желатин – це білок, ферменти організму (наприклад, колагенази) поступово руйнують його. Це дозволяє створювати системи з контрольованим вивільненням, де ліки надходять у кров по мірі розчинення носія [6].

Желатин є амфотерним, що дозволяє ефективно додавати різні класи речовин – гідрофільні малі молекули добре утримуються в порах за рахунок водневих зв'язків. Желатин захищає макромолекули (білки, пептиди, ДНК) від передчасної деградації ферментами шлунку чи крові. Часто використовуються желатин з наночастинки або ліпосоми у складі гібридних гідрогелів.

У роботі [7] представлено інноваційну систему трансдермальної доставки лікарських засобів із подвійним механізмом вивільнення, створену на основі гідрогелевої матриці зі зшитого желатину та натрійкарбоксиметилцелюлози (NaКМЦ). Система поєднує вивільнення лідокаїну гідрохлориду з мікроголок та пролонговане вивільнення з мікрокапсул, інтегрованих у підкладковий шар, що забезпечує контрольований терапевтичний ефект. Мікроголочки, отримані методом емульсійного зшивання з використанням глутаральдегіду, мали конічну форму, розміри 50–264 мкм і характеризувалися високими механічними властивостями та ефективною здатністю до проникнення в шкіру. Система продемонструвала рН-чутливе вивільнення з максимальними значеннями в кислому середовищі, ефективність при концентрації препарату 9,8 % та ефективність інкапсуляції 75,8 %. Дослідження *in vitro* виявили початковий швидке вивільнення препарату протягом перших 10 хвилин із подальшим пролонгованим вивільненням до 240 хвилин, що відповідає кінетичній моделі Корсмеєра–Пеппаса, а також підтвердили антимікробну активність і високу біосумісність системи, що свідчить про її перспективність як безпечної та ефектної основи для трансдермальної доставки лікарських засобів.

У сучасних дослідженнях трансдермальних систем доставки лікарських засобів значну увагу приділяють наноструктурованим гідрогелевим носіям на основі природних біополімерів, зокрема желатину. Перспективним підходом є створення наногелів желатину, зшитих альдегідвмісними полісахаридами, такими як ксантановий альдегід, що дозволяє формувати стабільні тривимірні полімерні сітки за механізмом реакції основи Шиффа. Описано застосування желатин-ксантанових наногелів для підвищення ефективності трансдермальної доставки ібупрофену – нестероїдного протизапального препарату з обмеженою проникністю через шкіру [8].

Гідрогелі на основі желатину можна модифікувати для реагування на конкретні умови в зоні хвороби. При зміні кислотності (наприклад, у пухлинах або запалених тканинах рН нижчий) гідрогель на основі желатину змінює заряд, що призводить до інтенсивного вивільнення ліків саме в цій зоні [9].

Використання желатину з певною температурою плавлення дозволяє вивільняти АФІ при місцевому нагріванні тканини.

Додавання наночастинок заліза дозволяє керувати рухом гідрогелю в організмі за допомогою зовнішнього магнітного поля.

У публікаціях досліджуються гідрогелі ПВС/желатин гідрогелів, які хімічно зшиті, а у якості зшиваючого агенту використовували глутаровий альдегід в кількості 0,2 %. Досліджено контрольоване вивільнення ванкомицину з гідрогельної плівки на основі ПВС:желатин 25:75 (мас.%) [10]. При таких співвідношеннях утворюється щільна полімерна структура, що уповільнює дифузію молекул АФІ та дозволяє досягати пролонгованого вивільнення.

Однак використання чистого желатину в трансдермальних системах обмежене його низькою механічною стабільністю при температурі тіла. Для вирішення цієї проблеми перспективним є створення композитних систем із додаванням полівінілового спирту (ПВС), який формує міцний структурний каркас, та гіалуронової кислоти (НА). Гіалуронова кислота, будучи природним глікозаміногліканом, не лише посилює гідрофільність системи, а й виступає активатором транспортних процесів у дермі.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи – є розробка та дослідження властивостей трикомпонентних гідрогелевих матеріалів на основі желатину, полівінілового спирту та гіалуронової кислоти (Желатин/ПВС/НА), які поєднують у собі високу механічну міцність, оптимальну пористість та здатність забезпечувати ефективне дифузійне вивільнення лікарських засобів у трансдермальних системах доставки.

Викладення основного матеріалу дослідження

В роботі для одержання гідрогелів використовували желатин (Trobas Gelatine BV, Нідерланди, вміст діючої речовини не менше 99,8 %) CAS 9000-70-8, гліцерин (BASF, Німеччина), полівініловий спирт (ПВС) марки PVA-17-99, гіалуронова кислота (НА) (Hyaluronic acid), CAS: 9004-61-9 (Німеччина), в якості зшиваючого агенту – глутаровий альдегід (CAS 111-30-8) в кількості 0,2 %.

Розчини 10 % желатину та ПВС змішували у співвідношенні 25/75, 50/50, 75/25 мас.ч. До цієї суміші додавали 0,5 % та 1 % гіалуронової кислоти (НА) від маси сухої речовини полімерного складу. У композиції у якості пластифікатора додавали гліцерин – 2 % (від маси сухого полімеру).

Гідрогелі отримували методом поливу розчину полімерної композиції на скляну поверхню.

Ступінь зшивання полімерної сітки, гідрофільність та пористість гідрогелів та прогнозування кінетики вивільнення АФІ у трансдермальних системах – є стандартними методами для оцінки властивостей цих гідрогелевих матеріалів.

Реологічні властивості досліджуваних зразків (Желатин/ПВС/НА без додавання зшиваючого агенту) визначали з використанням ротаційного реометра Brookfield DV-III (США), оснащеного термостатованою платформою. Вимірювання проводили за контрольованої температури в діапазоні 23–25 °С.

Дослідження здійснювали в режимі керованої швидкості зсуву в інтервалі від 10 до 230 с⁻¹, що дозволяло оцінити зміну ефективної в'язкості зразків залежно від умов деформації. Перед початком вимірювань зразки витримували на термоплатформі до досягнення температурної рівноваги.

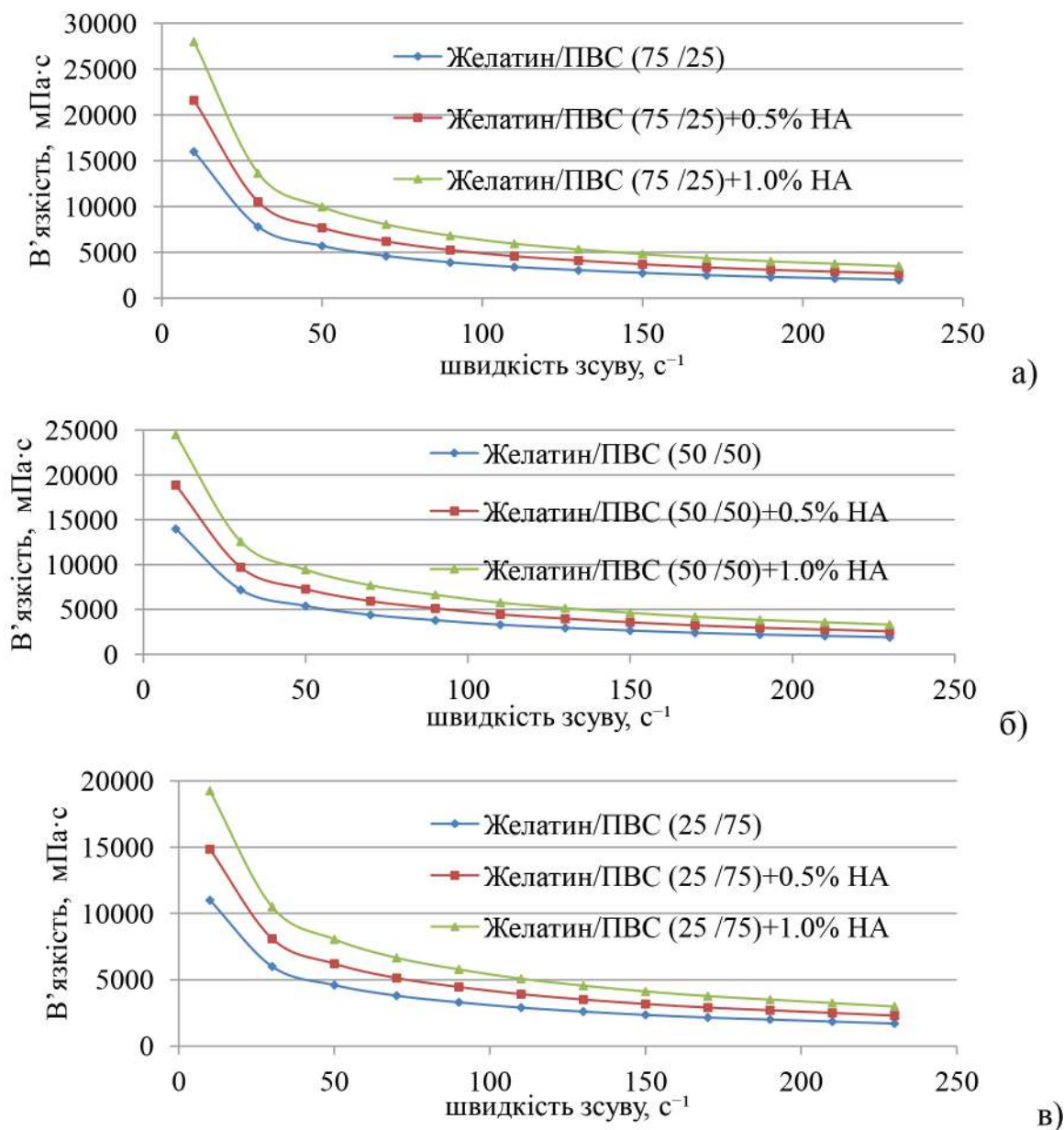


Рис. 1 Залежність в'язкості гідрогелевих систем від швидкості зсуву для композицій на основі желатину/полівінілового спирту (а) – 75/25, б) – 50/50, в – 25/75) без добавок та з додаванням гіалуронової кислоти (НА) у концентраціях 0,5 та 1,0 %

Результати реологічних досліджень представлені на рис. 1.

Отримані реологічні криві свідчать про неньютонівську поведінку досліджуваних систем та наявність псевдопластичних властивостей, що характерно для полімерних композицій. Зі збільшенням швидкості зсуву спостерігалось зниження в'язкості, що може бути пов'язано з руйнуванням міжмолекулярних взаємодій та частковим руйнуванням полімерної сітки.

Базові системи желатин/ПВС (75/25; 50/50; 25/75) характеризуються найнижчими значеннями в'язкості в досліджуваному діапазоні швидкостей зсуву. Додавання гіалуронової кислоти призводить до підвищення в'язкості, та залежить від концентрації. Композиції з 0,5 % НА демонструють проміжні значення в'язкості; а з 1,0 % НА характеризується найвищою початковою в'язкістю, особливо в області малих швидкостей зсуву.

При низьких швидкостях зсуву різниця між зразками є найбільш вираженою, що вказує на формування більш розвиненої структури з гіалуроновою кислотою. За високих швидкостей зсуву (понад 150–200 с⁻¹) криві зближуються, що свідчить про часткове руйнування міжмолекулярних взаємодій та домінування гідродинамічної поведінки полімерних ланцюгів.

Гелеву фракцію матеріалів визначали з використанням зразків діаметром 1,0 см. З початку зразки висушували у сушильній шафі при температурі 50 °С протягом 24 годин до досягнення сталої маси. Після цього висушені зразки занурювали у деіонізовану воду та витримували при температурі 37 °С протягом 72 годин для видалення розчинної (незшитої) фракції полімеру. Потім зразки виймали з води, поверхневу вологу видаляли фільтрувальним папером та повторно висушували при температурі 50 °С протягом 24 годин до сталої маси. Відсоток гелевої фракції розраховували відповідно до рівняння (1):

$$\text{Гелева фракція}(\%) = \frac{W_e}{W_0} \cdot 100, \quad (1)$$

де W_e – маса зразка гідрогелю після замочування у деіонізованій воді та повторного висушування;
 W_0 – початкова маса сухої зразка гідрогелевої плівки до замочування.

Додавання гіалуронової кислоти (НА) до композиції желатин/полівініловий спирт (ПВС), зшитої глутаровим альдегідом, істотно змінює структурні, сорбційні, механічні та дифузійні характеристики гідрогелевих плівок, що безпосередньо впливає на їх придатність як основи трансдермальних терапевтичних систем.

Гіалуронова кислота є високомолекулярним аніонним полісахаридом з численними –COOH та –ОН групами, у системі Желатин/ПВС/НА вона частково фізично вбудовується у тривимірну сітку, утворює водневі зв'язки з желатином і ПВС та не зшивається ковалентно глутаровим альдегідом (на відміну від аміногруп желатину).

При концентрації НА (0,5 мас.%) гелева фракція знижується на 3–5 %; при концентрації (1 мас.%) – зниження 8–10 % гелевої фракції через вимивання незшитої НА.

Дослідження кінетики набрякання. Сухі зразки зважували та занурювали у фосфатно-буферний розчин (рН 7,4). Витримували протягом 24 годин при температурі 37 °С для досягнення рівноваги. Після зразки виймали з буферного розчину, надлишкову поверхневу рідину видаляли фільтрувальним папером без механічного стиснення та зважували. Ступінь набрякання розраховували відповідно до рівняння (2):

$$\text{Ступінь набрякання}(\%) = \frac{W_e - W_d}{W_d} \cdot 100, \quad (2)$$

де W_e – маса зразка після гідратації у фосфатно-буферний розчин протягом 24 годин,
 W_d – початкова маса сухої гідрогелевої плівки.

Вміст у композиції гіалуронової кислоти 0,5 % призводить до зростання рівноважного ступеня набухання гідрогелів у фосфатно-буферному розчині до 500–650 %, що свідчить про формування високо гідрофільної, просторово розвиненої полімерної сітки з підвищеною здатністю до утримання води. Подальше підвищення концентрації гіалуронової кислоти до 1 % збільшує ступеня набухання до значень понад 700 %, але відбувається зниження механічних властивостей та руйнування гідрогелю. Це вказує на досягнення критичної концентрації гіалуронової кислоти, за якої осмотичний тиск і електростатичне відштовхування між поліаніонними ланцюгами переважають над силами міжмолекулярного зшивання, що обмежує практичне використання таких систем без додаткової структурної стабілізації.

Висновки

Додавання гіалуронової кислоти до системи желатин/ПВС підвищує в'язкість та посилює псевдопластичні властивості гідрогелів, що є важливим для регулювання реологічної поведінки матеріалів, призначених для трансдермальних терапевтичних систем та біомедичних гелів.

Включення гіалуронової кислоти призводило до зменшення гелевої фракції гідрогелевих плівок, що пов'язано з відсутністю її ковалентного зшивання глутаровим альдегідом та частковим вимиванням під час екстракції у водному середовищі.

Включення гіалуронової кислоти до гідрогелевих плівок на основі желатину та полівінілового спирту, зшитих глутаровим альдегідом, дозволяє регулювати водопоглинання, еластичність та кінетику вивільнення активних фармацевтичних інгредієнтів, що робить такі системи перспективними для застосування у трансдермальній терапії та покритті ран.

Список використаної літератури

1. Advancements in Hydrogels: A Comprehensive Review of Natural and Synthetic Innovations for Biomedical Applications / A.-E. Segneanu et al. *Polymers*. 2025. Vol. 17, no. 15. P. 2026. URL: <https://doi.org/10.3390/polym17152026>
2. Tailoring Therapy: Hydrogels as Tunable Platforms for Regenerative Medicine and Cancer Intervention / C. Munteanu et al. *Gels*. 2025. Vol. 11, no. 9. P. 679. URL: <https://doi.org/10.3390/gels11090679>
3. Revolutionizing Drug Delivery: The Impact of Advanced Materials Science and Technology on Precision Medicine / M. El-Tanani et al. *Pharmaceutics*. 2025. Vol. 17, no. 3. P. 375. URL: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17030375>
4. The Role of Natural Hydrogels in Enhancing Wound Healing: From Biomaterials to Bioactive Therapies / P. S. Pintilei et al. *Pharmaceutics*. 2025. Vol. 17, no. 10. P. 1243. URL: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17101243>

5. Investigation of the influence of pH on the properties and morphology of gelatin hydrogels / K. J. Goudie et al. *Journal of Polymer Science*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1002/pol.20230141>
6. On the role of hydrogel structure and degradation in controlling the transport of cell-secreted matrix molecules for engineered cartilage / V. Dhote et al. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2013. Vol. 19. P. 61–74. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.10.016>
7. A development of a gelatin and sodium carboxymethyl cellulose hydrogel system for dual-release transdermal delivery of lidocaine hydrochloride / S. Bahmani et al. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. P. 138034. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138034>
8. Development of New Xanthan-Aldehyde/Gelatin Nanogels for Enhancement of Ibuprofen Transdermal Delivery: In-Vitro/Ex-Vivo/In-Vivo Evaluation / Y. Nait Bachir et al. *ChemEngineering*. 2025. Vol. 9, no. 2. P. 35. URL: <https://doi.org/10.3390/chemengineering9020035>
9. Calderon Moreno J. M., Chelu M., Popa M. Biocompatible Stimuli-Sensitive Natural Hydrogels: Recent Advances in Biomedical Applications. *Gels*. 2025. Vol. 11, no. 12. P. 993. URL: <https://doi.org/10.3390/gels11120993>
10. Development of Biocompatible Coatings with PVA/Gelatin Hydrogel Films on Vancomycin-Loaded Titania Nanotubes for Controllable Drug Release / T. Wattanavijitkul et al. *ACS Omega*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03942>

References

1. 1. Segneanu, A.-E., Bejenaru, L. E., Bejenaru, C., Blendea, A., Mogoșanu, G. D., Biță, A., & Boia, E. R. (2025). Advancements in Hydrogels: A Comprehensive Review of Natural and Synthetic Innovations for Biomedical Applications. *Polymers*, 17(15), 2026. <https://doi.org/10.3390/polym17152026>
2. Munteanu, C., Prifti, E., Surd, A., & Mârza, S. M. (2025). Tailoring Therapy: Hydrogels as Tunable Platforms for Regenerative Medicine and Cancer Intervention. *Gels*, 11(9), 679. <https://doi.org/10.3390/gels11090679>
3. El-Tanani, M., Satyam, S. M., Rabbani, S. A., El-Tanani, Y., Aljabali, A. A. A., Al Faouri, I., & Rehman, A. (2025). Revolutionizing Drug Delivery: The Impact of Advanced Materials Science and Technology on Precision Medicine. *Pharmaceutics*, 17(3), 375. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17030375>
4. Pintilei, P. S., Binaymotlagh, R., Chronopoulou, L., & Palocci, C. (2025). The Role of Natural Hydrogels in Enhancing Wound Healing: From Biomaterials to Bioactive Therapies. *Pharmaceutics*, 17(10), 1243. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17101243>
5. Investigation of the influence of pH on the properties and morphology of gelatin hydrogels / K. J. Goudie et al. *Journal of Polymer Science*. 2023. <https://doi.org/10.1002/pol.20230141>
6. Dhote, V., Skaalure, S., Akalp, U., Roberts, J., Bryant, S. J., & Vernerey, F. J. (2013). On the role of hydrogel structure and degradation in controlling the transport of cell-secreted matrix molecules for engineered cartilage. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 19, 61–74. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.10.016>
7. A development of a gelatin and sodium carboxymethyl cellulose hydrogel system for dual-release transdermal delivery of lidocaine hydrochloride / S. Bahmani et al. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. P. 138034. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138034> (date of access: 23.01.2026).
8. Nait Bachir, Y., Mohamed Said, R., Abdelli, M. L., Namaoui, W., Medjkane, M., Boudjema, N., Issaadi, H. M., & Restrepo Parra, E. (2025). Development of New Xanthan-Aldehyde/Gelatin Nanogels for Enhancement of Ibuprofen Transdermal Delivery: In-Vitro/Ex-Vivo/In-Vivo Evaluation. *ChemEngineering*, 9(2), 35. <https://doi.org/10.3390/chemengineering9020035>
9. Calderon Moreno, J. M., Chelu, M., & Popa, M. (2025). Biocompatible Stimuli-Sensitive Natural Hydrogels: Recent Advances in Biomedical Applications. *Gels*, 11(12), 993. <https://doi.org/10.3390/gels11120993>
10. Wattanavijitkul, T., Khamwannah, J., Lohwongwatana, B., Puncreobutr, C., Reddy, N., Yamdech, R., Cherdchom, S., & Aramwit, P. (2024). Development of Biocompatible Coatings with PVA/Gelatin Hydrogel Films on Vancomycin-Loaded Titania Nanotubes for Controllable Drug Release. *ACS omega*, 9(35), 37052–37062. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03942>

Дата першого надходження статті до видання: 11.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

А. О. КЕЛЕМЕШ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-9429-8570

А. М. ХМЕЛЕНКО

здобувач ступеня доктора філософії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0007-5357-7152

КОМБІНОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ МОТОРНИХ ОЛИВ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНИХ ГІДРОСИСТЕМ

У статті здійснено узагальнення та порівняльний аналіз сучасних методів очищення і регенерації відпрацьованих моторних олив з позицій їх технічної ефективності, можливостей практичного впровадження та доцільності використання в інженерних системах. Актуальність дослідження зумовлена зростанням обсягів утворення відпрацьованих мастильних матеріалів, високою вартістю первинних нафтопродуктів, а також необхідністю зменшення негативного впливу відходів на довкілля та виробниче середовище. Показано, що відпрацьовані моторні оливи зберігають значний потенціал для повторного використання за умови застосування ефективних технологій очищення.

У роботі систематизовано фізичні, фізико-хімічні, хімічні та комбіновані методи очищення моторних олив. До фізичних методів віднесено відстоювання, фільтрацію, центрифугування, вакуумну дистиляцію, магнітне та ультразвукове очищення. Розглянуто їх переваги, обмеження та область раціонального застосування. Проаналізовано фізико-хімічні методи, зокрема адсорбцію, екстракцію розчинниками, коагуляцію, флокуляцію, мембранні та термоокислювальні процеси, які забезпечують більш глибоке видалення продуктів старіння та окислення олив. Особливу увагу приділено хімічним методам очищення, включно з кислотно-лужною обробкою та гідроочищенням, як таким, що дозволяють отримувати базові оливи з властивостями, наближеними до первинних.

На основі аналізу літературних джерел встановлено, що жоден з одиничних методів не забезпечує повного відновлення експлуатаційних властивостей моторної оливи в умовах підприємств малого та середнього масштабу. Обґрунтовано доцільність застосування комбінованих технологій очищення, які поєднують послідовні стадії відстоювання, відцентрового розділення, коагуляційної обробки, сепарації та тонкої фільтрації. Показано, що такі методи дозволяють видаляти механічні домішки та частинки розміром до 1 мкм і забезпечують отримання очищеної оливи, придатної для використання в гідравлічних системах і гідроприводах спрощеної конструкції. Отримані узагальнення можуть бути використані при розробленні та виборі технологічних схем регенерації відпрацьованих моторних олив для інженерних застосувань.

Ключові слова: моторна олива, відпрацьована олива, очищення олив, регенерація мастильних матеріалів, комбіновані методи очищення, фільтрація, центрифугування, адсорбція, гідравлічні системи.

A. O. KELEMESH

PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Agricultural Engineering
and Automobile Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0001-9429-8570

A. M. KHELENKO

Postgraduate Student
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0009-0007-5357-7152



COMBINED TECHNOLOGIES FOR THE PURIFICATION OF USED MOTOR OILS FOR ENGINEERING HYDRAULIC SYSTEMS

The paper presents a comprehensive review and comparative analysis of modern methods for the purification and regeneration of used motor oils from the standpoint of their technical efficiency, practical applicability, and feasibility for engineering systems. The relevance of the study is driven by the growing volumes of used lubricating materials, the increasing cost of primary petroleum resources, and the necessity to reduce the negative environmental and industrial impacts associated with improper disposal of waste oils. It is demonstrated that used motor oils retain a significant potential for reuse provided that effective purification technologies are applied.

The study systematizes physical, physicochemical, chemical, and combined methods of motor oil purification. Physical methods considered include sedimentation, filtration, centrifugation, vacuum distillation, magnetic separation, and ultrasonic treatment. Their advantages, limitations, and areas of rational application are analyzed. Particular attention is given to physicochemical methods such as adsorption, solvent extraction, coagulation, flocculation, membrane separation, and thermo-oxidative treatment, which enable deeper removal of aging products and oxidation compounds. Chemical purification methods, including acid-alkali treatment and hydrotreating, are also examined as technologies capable of restoring base oils with properties close to those of virgin lubricants.

Based on the analysis of scientific literature, it is established that no single purification method ensures complete restoration of the performance properties of used motor oils, especially under the conditions of small and medium-scale industrial enterprises. The expediency of applying combined purification technologies is substantiated. Such technologies integrate sequential operations of sedimentation, centrifugal separation, coagulation treatment, phase separation, and fine filtration. It is shown that combined methods make it possible to remove mechanical impurities and contaminant particles with sizes up to 1 μm , thereby producing purified oils suitable for reuse as working fluids in hydraulic systems and simplified hydraulic drives. The presented generalizations may be applied in the development and selection of technological schemes for the regeneration of used motor oils in engineering practice.

Key words: motor oil, used oil, oil purification, lubricant regeneration, combined purification methods, filtration, centrifugation, adsorption, hydraulic systems.

Постановка проблеми

Моторна олива виготовляється переважно з нафти, яка є обмеженим, невідновлювальним ресурсом. Це означає, що в майбутньому її виготовлення буде проблематичним через брак нових запасів нафти. Це у свою чергу буде супроводжуватися зростанням цін на останню. А тому пошук нових видів палива наразі актуалізовано. Перехідним етапом у цьому тривалому та наукомісткому процесі, на нашу думку, є регенерація відпрацьованої моторної оливи, різні аспекти якої нині активно дискутуються у світі. Крім того проблема забруднення навколишнього природного середовища скиданням відпрацьованої моторної оливи також потребує нагального вирішення, зокрема, шляхом переробки останньої. До того ж регенерація відпрацьованих моторних олив не позбавлена економічних зисків. На практиці використовуються різні методи переробки, а робота над їх удосконаленням та пошуком нових методів, зокрема комплексних, триває. У цьому сенсі за останні десятиліття було розроблено низку методів переробки, спрямованих на вирішення екологічних, технічних та економічних проблем, пов'язаних з відпрацьованими оливами [18]. Відповідно, обрана нами тематика наукового дослідження, не тільки не втрачає актуальності, але й набуває з часом більшої значущості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Більш відомі методи очистки моторної оливи згруповані як фізичні, хіміко-фізичні, хімічні та комбіновані [1, 4, 5]. Розглянемо переваги і недоліки цих способів очищення, виходячи з наявних літературних даних.

Розглядаючи фізичні методи очищення, зазначимо:

Відстоювання – перша і обов'язкова операція процесу регенерації. Механічні домішки і вода, що знаходяться в оливі в зваженому стані, осідають протягом 2-18 годин у залежності від температури нагріву та висоти стовпа рідини. Відстій застосований на принципі осадження частинок під дією їх сили тяжіння. Швидкість осадження (з рівняння Стокса) частинок тим більше, чим більше їх розмір і питома вага і менша в'язкість рідини. В першу чергу випадають в осад металеві частинки і смолянисті речовини. Відстій відбувається на основі осадження механічних частинок, які мають густину, яка перевищує густину оливи в полі сили тяжіння.

Осадження часток під дією відцентрових сил проводять в гідроциклонах, центрифугах і сепараторах. Пристрої для очищення рідини в полі відцентрованих сил прості за конструкцією, компактні. Сепаратори прості в обслуговуванні, мають високу продуктивність і невелику вартість. При очищенні рідин в полі відцентрових сил відцентрове прискорення істотно більше гравітаційного прискорення, що дозволяє збільшити швидкість видалення з оливи домішок [4].

Відстій в циклонах. Він найбільш ефективний при очищенні стічних вод від тонкодисперсних твердих частинок. Повноту очищення в центрифугі за один прохід через ротор можна визначити коефіцієнт очищення оливи. Ефективність роботи пристроїв, що використовують для видалення з рідин небажаних домішок, залежить від фізичних властивостей рідини і твердої фази (в'язкість, питома вага, діаметр твердих частинок), а також

конструктивних параметрів циклонів. Відцентровий спосіб очищення рідини дозволяє видаляти домішки розмірами від 2...3 мкм і вище. Недоліками даного способу є те, що зі збільшенням в'язкості рідини ефективність очищення різко знижується, крім того з масла не видаляються продукти окислення і термічні розкладання. Органічні сполуки, смолисті і асфальтові речовини, що мають розміри менше 1 мкм і знаходяться в оливі в колоїдному стані, які не будуть видалені з оливи фізичними способами. Колоїдні системи знаходяться в кінетичній рівновазі, володіють великим надлишком поверхневої енергії, що веде до термодинамічної нестійкості таких систем.

При броунівському русі колоїдні частинки вільно зближуються на відстань до 10^{-7} м, однак подальшому їхньому зближенню перешкоджає надлишковий тиск, що діє з боку тонкого шару та обмежують його поверхні. Виникнення цього шару обумовлено впливом електростатичних полів. Ідея коагуляції полягає в нейтралізації цих полів шляхом добавки до відпрацьованої оливи так званих коагуляторів. Дані речовини нейтралізують електростатичні поля, що сприяють зближенню колоїдних частинок і об'єднанню їх у великі конгломерати, що дозволяє фізичними методами видалити ці речовини з оливи [6].

В іншому способі в процесі фільтрації використовується реальна мембрана. Процес здійснюється при постійній температурі. Ефективність фільтрації оливи залежить від типу фільтра і від використаних фільтрувальних матеріалів. Тонкість фільтрації до 5 мкм. У міру забивання фільтрів збільшується їх гідравлічний опір і поліпшується тонкість очищення. Недоліком фільтрації є недостатня брудоемність фільтрів і неможливість видаляти з оливи органічні сполуки і частки, що утворюються в ній, які мають розміри нижче 3 мкм. Як наслідок, після очищення має темний колір і неприємний запах. Освітлення оливи можливе тільки при ультра і мікрофільтрації.

Напівпроникні мембрани забезпечують поділ на поверхні матеріалу, їх пори недоступні для затримки компонента і тому не повинні забиватися.

Для збільшення продуктивності фільтрації через недостатню брудоемність процес фільтрації організовують таким чином, що мембрана розділяє потік на дві складові, одна з них проходить через мембрану, а інша очищає поверхню мембрани від осілих на неї частинок. У звичайних фільтрах вся рідина проходить через фільтр.

Аналізуючи дані роботи [7] по дослідженню плоскопаралельних мембран з полісілану, слід зазначити, що при тиску 0,3 МПа і температурі 25 °С питома продуктивність складала $q = 5,9$ л/(м² · год) з коефіцієнтом очищення 87,8 %.

Проведений аналіз фізичних способів показав, що жоден із способів не задовольняє вимогам, що пред'являються до регенерації масла безпосередньо в підприємствах агропромислового комплексу.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є пошук шляхів підвищення ефективності використання відпрацьованої моторної оливи шляхом застосування сучасних комбінованих методів очищення з подальшим використанням в якості робочих рідин для відносно простих гідравлічних систем та гідроприводів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Кожного дня у світі виробляється та використовується величезна кількість різноманітних марок оливи. За існуючими підрахунками тільки у Києві щодня зливається не менше 20 тис. тон відпрацьованої оливи [3], що актуалізує питання її відновлення та утилізації. На думку експертів, більшість відходів зливають до загальної каналізації, а це створює загрозу для довкілля [6].

Регенерація моторної оливи – це процес відновлення її властивостей для повторного використання. Процес є важливим з екологічної та економічної точки зору, оскільки зменшує кількість відходів та витрати на виробництво нової оливи. Проблема очищення відпрацьованих моторних олиг є критично важливою як для збереження природних ресурсів [18], так і для екологічної стійкості загалом [12].

Існує кілька основних методів регенерації, які з урахуванням багатьох факторів, мають різну ефективність та справляють різний вплив на навколишнє середовище. Кожен з наведених нижче методів має свої переваги та недоліки.

Загалом усі методи очистки моторної оливи умовно поділяють на чотири групи: фізичні, хіміко-фізичні, хімічні та комбіновані. Наголосимо, що перелік конкретних методів, що входять до тієї чи іншої групи, не є вичерпним, а лише орієнтовним, що пов'язано із постійним розвитком науки та практики. Розглянемо приклади таких базових методів.

Фізичні методи включають процеси, що використовують фізичні властивості компонентів для їхнього розділення. Вони спрямовані на видалення переважно механічних домішок, води на легких фракціях без зміни хімічної природи оливи [4].

Відстоювання (седиментація) є найпоширенішим та недорогим методом, який передбачає видалення механічних домішок шляхом відстоювання оливи. Це дозволяє твердим забруднювачам та осаду (що мають вищу густину, ніж олива) осісти на дно. Перевагою методу є те, що він не потребує додаткового обладнання, оскільки видаляє великі тверді частинки, воду та осад під дією сили тяжіння. Однак, він є тривалим у часі й не видаляє всі забруднення, зокрема, дрібнодисперсні домішки [5, 12, 11]. Відстоювання доцільно застосовувати як першу (попередню) стадію очистки. Після чого слід провести додаткові стадії регенерації. Отже, відстоювання не є ефективним для видалення емульгованої води, розчинених забруднень та менших частинок [12].

Фільтрація – пропускання оливи через фільтри різного ступеня очищення для видалення механічних домішок та частинок [12]. Можуть використовуватися різні типи фільтрів, наприклад, металеві сітчасті фільтри, картриджні

фільтри, центрифуги або фільтри з активованим вугіллям. Фільтрація має низьку енергозатратність [5]. Метод є простим та доступним, але не передбачає видалення розчинених смол, кислот і води. Він є неефективним для розчинених домішок та емульгованої води, проте є найбільш ефективним для видалення механічних домішок. До того ж фільтруючий елемент потребує утилізації або відновлення через засмічення [5, 12]. Тонка фільтрація (видалення частинок менше 10–15 мкм) є зазвичай завершальною операцією. Як і метод відстоювання, фільтрація часто використовується у якості попереднього етапу у процесі комплексного очищення відпрацьованої моторної оливи.

Центрифугування (відцентрова очистка) – використання відцентрової сили для розділення суміші на компоненти з різною густиною. Цей метод дозволяє ефективно видаляти воду та механічні домішки. Очищення відбувається достатньо швидко, але потребує високовартісного обладнання. Високошвидкісні центрифуги (10000–12000 об/хв) відрізняються високою сепараційною ефективністю. При цьому не видаляються розчинені домішки, а тому виникає потреба у доочищенні оливи [5].

Вакуумна дистиляція (випарювання) – видалення легких фракцій (бензину, газу) шляхом випарювання при зниженому тиску. Процес проводиться за високих температур (наприклад, 250–350 °C) і під високим вакуумом, щоб розділити фракції на основі їхніх точок кипіння [16]. Під час нагрівання відпрацьованого масла леткі компоненти випаровуються, а конденсовані пари збираються у вигляді очищеного масла. Тонкоплівкове вакуумне випарювання є достатньо перспективним і ефективним для видалення дизельного палива та води з відпрацьованої моторної оливи. Загалом метод вакуумної дистиляції вважається ефективним, проте потребує високих енергозатрат і складного обладнання [5]. Також процес може бути дорогим з точки зору капітальних витрат [6, 12]. Через складність обладнання застосування методу потребує також висококваліфікованого обслуговування [16, 17]. Тому він підходить для великих потужностей [17]. На відміну від вищеописаних методів за допомогою вакуумної дистиляції можна відновити базову оливу для повторного використання [12].

Магнітне очищення – видалення металевих частинок (дрібнодисперсних металевих продуктів зносу) за допомогою магнітних полів. Олива проходить через магнітний фільтр. Металеві домішки (залізо, сталь) притягуються магнітом і затримуються. У процесі проходження оливи через електромагнітний фільтр створюється електромагнітне поле, при цьому феромагнітні частинки утримуються в місцях контакту сталевих дробин [2]. Перевагами цього методу є те, що видаляються абразивні частинки та зменшується знос двигуна. Проте він є неефективним для немагнітних частинок, наприклад, піску та сажі. Потреба у видаленні феромагнітних продуктів зносу (таких як залізо) є критичною для регенерації моторної оливи [10, 19]. Але через звужений спектр дії метод магнітного очищення застосовується лише як складова комплексних багатоступеневих технологій очищення оливи.

Ультразвукове очищення – руйнування забруднень ультразвуковими коливаннями. Ультразвукова обробка є одним із перспективних фізичних методів впливу, що застосовуються для очищення та поліпшення експлуатаційних властивостей відпрацьованих оливи [1, 13]. Метод характеризується достатньо глибоким очищенням, низьким рівнем забруднення, проте й високою вартістю. Крім того він є неефективним проти хімічних забруднень.

Фізико-хімічні методи часто використовуються для більш глибокого очищення, оскільки вони здатні видаляти як механічні домішки, так і деякі продукти старіння та окиснення.

Адсорбція передбачає використання пористих матеріалів, таких як активоване вугілля, цеоліти або глини, для поглинання органічних кислот, смол та інших домішок. Метод характеризується відносною екологічністю, але його ефективність обмежена проти важких відкладень [8, 11, 12]. Адсорбція застосовується для первинної очистки, в тому числі для фінального освітлення [16, 20]. Очищення та регенерація відпрацьованих моторних оливи часто проводиться з використанням локальних видів адсорбентів. У США більше половини усіх базових оливи вторинної переробки отримують внаслідок застосування методу адсорбції [6]. При цьому використовуються активовані глини, які походять з самої Америки. Частина використовуваних глини для процесу адсорбції моторних оливи в Україні купують саме у США. Загалом метод має високу ефективність видалення широкого спектру забруднень та характеризується балансом між ефективністю та сталим розвитком, хоча необхідно враховувати вартість та доступність адсорбуючих матеріалів [12]. Досліджуваний метод, не дивлячись на усі переваги, не позбавлений недоліків. Зокрема, у процесі його застосування утворюється велика кількість відпрацьованого сорбенту, який важко утилізувати [4]. Також з оливи може бути видалено присадки, наприклад, інгібітори окислення [7].

Екстракція розчинником використовує розчинники для розчинення домішок з масла. Потім розчинник відокремлюється, залишаючи очищену оливу. Метод заснований на вибіркового розчиненні окремих речовин (кисневих, сірчистих, азотних сполук, поліциклічних вуглеводнів). Зазвичай використовувани розчинники включають гексан, толуол, пропан, 1-бутанол, метил етил кетон (МЕК), ацетон [15, 18]. Метод вирізняється ефективним видаленням важкорозчинних домішок, включно з присадками [12, 17], але потребує подальшого очищення від розчинника. Крім того, застосування згаданого методу породжує виклики щодо утилізації розчинників та потенційного впливу на навколишнє середовище [12] та потребує кваліфікованого персоналу [16, 17].

Коагуляція – створення великих частинок домішок, які потім легко видаляються фільтруванням або відстоюванням. Позитивним є те, що добре видаляються важкорозчинні домішки. Але очищена у такий спосіб олива потребує подальшого очищення, а коагулянт є високовартісним [20].

Одним з різновидів коагуляції є флокуляція – використання спеціальних реагентів (флокулянтів, наприклад, полімери, крохмаль, желатин) для агрегації дрібних частинок у більш утворення для більш легкого відфільтрування. Відокремлення відбувається шляхом фільтрації або центрифугування. Використання цього методу призводить до підвищення ефективності фільтрації, чистоти оливи, але вимагає підбору відповідного реагенту. Флокуляція може бути використана у поєднанні з екстракцією для регенерації відпрацьованої мастильної оливи.

Термоокислювальне очищення полягає у нагріванні мінеральної оливи до 200–400 °С у присутності кисню або каталізаторів для розкладання шкідливих сполук. При цьому відбувається руйнування смолистих сполук і часткова регенерація базової оливи, а виділені газоподібні продукти відводяться. Метод характеризується оновленням властивостей оливи, ефективним виділенням важких домішок та, разом з тим, високими енергетичними витратами і можливістю утворення токсичних випарувань [14, 20].

Мембранне очищення передбачає використання напівпроникних мембран для розділення компонентів у потоці, що є особливо ефективним для видалення дрібнодисперсних продуктів старіння. Саме розділення продуктів у потоці, тобто без осадження на фільтроматеріалі осаду, який з часом закупорює робочу пористу поверхню фільтра, є тією характеристикою, що відрізняє мембранне очищення від традиційних методів фільтрування. В ході очистки використовуються пористі мембрани, наприклад, з поліефірсульфону, поліакрилонітрилу, полівініліденфториду, для розділення забруднень за розміром [18]. Метод вважається ефективним щодо видалення дрібних частинок, емульгованої води і деяких розчинених домішок, ресурсозберігаючим, проте дорогим [16]. Окрім того, що мембрани мають доволі високу вартість, вони також можуть бути засміченими, що знижує ефективність очищення відпрацьованої моторної оливи [12].

Хімічні методи. Кислотно-лужне очищення полягає у використанні кислот та лугів для осадження та розчинення забруднень. При цьому олию змішують із сірчаною або іншою кислотою, що сприяє коагуляції домішок. Після цього додається лужний розчин, який нейтралізує кислоту та видаляє залишкові кислоти і продукти окислення. Уже очищена олива промивається водою та висушується. Застосування даного методу характеризується високою ефективністю очистки при достатньо простому апаратному супроводі [6]. Разом з тим метод передбачає використання агресивних реагентів та утворення небезпечних відходів. Донедавна це був найпоширеніший метод очистки моторної оливи у світі, особливо в країнах, де не було доступу до сучасних технологій регенерації. Однак сьогодні його застосування значно скоротилося через екологічні проблеми та заміну його більш екологічними альтернативами, такими як гідроочищення та адсорбційне очищення.

Гідроочищення передбачає використання водню для відновлення молекул оливи та видалення шкідливих сполук. Олива нагрівається і піддається дії водню під високим тиском у присутності каталізатора. Відбувається руйнування сірчаних і кисневмісних сполук. Слід зазначити, що метод гідроочищення вирізняється високою якістю очищення і відновлення властивостей оливи. Але процес загалом є складним та потребує дороговартісного обладнання [5, 16]. Також цей метод є найпоширенішим і одним з найефективніших у світі, оскільки дозволяє отримати очищену моторну оливу з характеристиками, близькими до нової. Він активно використовується на нафтопереробних заводах та у підприємствах, що спеціалізуються на регенерації відпрацьованих мастил. Разом з тим для застосування на невеликих підприємствах він є надто вартісним. Тому є економічно вигідний лише при переробці дуже великих обсягів відпрацьованих олив (понад 50–60 тис. т/рік) [5].

Очищення реагентами – додавання спеціальних хімічних реагентів (поліфосфатів, карбонатів, комплексоутворювачів) для осадження та нейтралізації шкідливих сполук. Метод передбачає подальшу фільтрацію або відстоювання. Позитивним є швидкість очищення та можливість адаптації під конкретний тип забруднення. Проте цей метод не завжди підходить для глибокого очищення.

Комбіновані методи очистки моторної оливи поєднують у собі вищеописані технології у різних конфігураціях їх поєднання. Застосування таких методів з однієї сторони може забезпечити більш якісне очищення оливи, але й збільшує кількість викликів. Зокрема, вибір комбінованого методу позначається на його вартості, оскільки при використанні декількох технологій можуть знадобитися спеціалізоване обладнання, хімічні реагенти чи інші засоби. Складність полягає також у процедурах контролю окремих складових комбінованого методу [9, 12, 14, 16]. При виборі комбінації методів враховують вимоги до якості регенованої оливи, наявні ресурси та екологічні нормативи.

Висновки

За результатами оглядових порівняльних досліджень найбільшу технологічну перевагу можливо надати комбінованому методу очищення відпрацьованих мастильних матеріалів. Такий метод може об'єднувати низку послідовних технологічних очисних операцій: відстоювання відпрацьованої оливи, центрифугування, обробку оливи коагулятором, сепарація, тонка фільтрація. До переваг даного методу можливо віднести видалення з відпрацьованої моторної оливи частинок та механічних домішок, геометричними розмірами – не більше 1 мкм.

Очищені за допомогою такого методу оливи більш доцільно використовувати в гідравлічних системах та гідравлічних приводах спрощеної конструкції, наприклад в гідросистемах, де джерелами енергії є гідравлічні насоси шестеренного типу, використовуються золотникові гідророзподільники з мускульним керуванням, робоча температура рідини не перевищує 70 °С, номінальний тиск в гідросистемі – до 12,5 МПа.

Список використаної літератури

1. Уминський С., Макачук В., Королькова М., Дмитрієва С., Житков С. Гідродинамічне обладнання для регенерації відпрацьованих мастил. *Аграрний вісник Причорномор'я*. 2019. Вип. 95. С. 181–187. <https://doi.org/10.37000/abbsl.2019.95.26>
2. Журавель Д. П. Забезпечення надійності гідросистем сільськогосподарської техніки шляхом очищення робочих рідин. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету : електронне наукове фахове видання*. 2020. Вип. 10, том 2. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-2-3>
3. Куди дівається відпрацьована моторна олива? *Ecointel*. URL: <https://ecointel.com.ua/kudy-divayetsya-vidpraczuвана-motorna-oliva/> (дата звернення: 10.01.2026).
4. Оливи. Моторні, турбінні, гідравлічні та трансмісійні: властивості та якість. Підручник / С. Бойченко, А. Пушак, П. Топольницький та ін.; за ред. проф. С. Бойченка. К. : «Центр учбової літератури», 2019. 323 с.
5. Korchak B., Hrynshyn O., Chervinskyy T., Pyshyev S. Functional-cost analysis of methods of regeneration of used mineral motor oils. *Chemistry, Technology and Application of Substances*. 2021. Vol. 4, No. 2. P. 33–39. <https://doi.org/10.23939/ctas2021.02.033>
6. Чайка О. Г., Чайка Ю. А. Порівняльний аналіз методів очищення відпрацьованих олив на Україні та за її межами. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2009. Вип. 664. С. 224–228. URL: https://vlp.com.ua/files/55_6.pdf (дата звернення: 10.01.2026).
7. Adesina L. M., Saadu K., Ajenikoko G. A. Transformer Oil Regeneration as a Panacea for Electric Power Utility Company's Equipment Optimization. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019. Vol. 8, Issue 2. P. 2160–2167. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B2364.078219>
8. A. A. Aboje, A. A. Jibril, H. Uthman, N. Bello. Analysis of Acid Options in the Purification of Spent Motor Engine Oil Using Acidified Clay. *Technology in Engineering Management & Applied Science*. 2024. Vol. XIII, Issue IX. P. 122–130. <https://doi.org/10.51583/IJLTEMAS.2024.130912>
9. Cabrera-Escobar C., Moreno-Gutiérrez J., Rodríguez-Moreno R., Pájaro-Velázquez E., Calderay-Cayetano F., Durán-Grados V. A Review on Global Recovery Policy of Used Lubricating Oils and Their Effects on the Environment and Circular Economy. *Environments*. 2025. № 12, 135. <https://doi.org/10.3390/environments12050135>
10. Ratiu S. A., Mihon N. L., Laza I., Armioni M. D. A review on the contamination of used engine oil. *Ingineria automobilului*. 2020. № 57. P. 20–25. <https://www.researchgate.net/publication/346573076> (application date: 10.01.2026).
11. Aliev A., Ganieva S., Smanov B., Adizov B., Rakhimov B. Environmentally friendly regeneration of used energy oils. *VIII International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023)*. 2023. Vol. 390. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339005043>
12. Hassanpour M. Transformer Oil Generation and Regeneration Techniques Based on Recent Developments (A Review). *International Journal of Petroleum Technology*. 2021. Vol. 8. P. 24–42. <https://doi.org/10.15377/2409-787X.2021.08.3>
13. Korchak B., Grynshyn O., Chervinskyy T., Nagurskyy A., Stadnik V. Integrated regeneration method for used mineral motor oils. *Chemistry & Chemical Technology*. 2021. Vol. 15, No. 2. P. 239–246. <https://doi.org/10.23939/chcht15.02.239>
14. Mu'azu M., Abdulsalam S., El-Nafaty U. A. Optimisation of Base Oil Regeneration Using Response Surface Methodology From Spent Lubricating Oil Through Binary Solvent Extraction Process. *Path of Science*. 2024. Vol. 10. No 10. P. 2048–2057. <https://doi.org/10.22178/pos.109-25>
15. Parekh K., Gaur R., Shahabuddin S. Recent Advances in Reclamation of Used Lubricant Oil. Tailored Functional Materials: Select Proceedings of MMETFP 2021 (Springer Proceedings in Materials, 15). P. 273–282. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2572-6_21
16. Ahmed D. J., Raad M., Chali M., Bahjat A. Purification of Used Lubricating Oils Using Vacuum Distillation. *Journal of Petroleum Research and Studies*. 2024. Vol.14, № 1. P. 111–130. <http://doi.org/10.52716/jprs.v14i1.766>
17. Ratiu S. A., Mihon N. L., Armioni M. D. Study On The Recycling Methods Of Used Engine Oil. *Ingineria automobilului*. 2020. № 55. P. 20–22. URL: <https://www.researchgate.net/publication/342899290> (application date: 10.01.2026).
18. Zelenko Y., Bezovska M., Kuznetsov V., Muntian A. Resource Saving and Eco-Friendly Technology for Disposal of Used Railroad Engine Oils. *Middle Pomeranian Scientific Society of the Environment Protection*. 2020. Vol. 22. P.171–180. <https://www.researchgate.net/publication/348430877> (application date: 10.01.2026)
19. Sadraddin A. S., Haji J. A. Regeneration of Engine Used Oils by Solvent Extraction. *Iraqi Journal of Science*. 2022. Vol. 63, No. 12. P. 5119–5130. <https://doi.org/10.24996/ij.s.2022.63.12.3>
20. Korchak B., Grynshyn O., Chervinskyy T., Shapoval P., Nagurskyy A. Thermooxidative regeneration of used mineral motor oils. *Chemistry & Chemical Technology*. 2020. Vol. 14, No. 1. P. 129–134. <https://doi.org/10.23939/chcht14.01.129>

References

1. Uminskij, S., Makarchuk, V., Korol'kova, M., Dmitrieva, S., & Zhitkov, S. (2019). Hydrodynamic equipment for the regeneration of waste oils. *Agrarian Herald of the Black Sea Region*, 95, 181–187. <https://doi.org/10.37000/abbsl.2019.95.26>
2. Zhuravel, D. (2020). Ensuring the reliability of hydraulic systems in agricultural machinery by cleaning working fluids. *Scientific Bulletin of Tavria State Agrotechnological University: electronic scientific professional publication*, 10(2). <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-2-3>
3. Where does used motor oil go? Ecointel. URL: <https://ecointel.com.ua/kudy-divayetsya-vidpracovana-motorna-oliva/> (application date: 10.01.2026).
4. Boichenko, S., Pushak, A., & Topolnitsky, P. (2019). *Oils. Engine, turbine, hydraulic and transmission oils: properties and quality* (S. Boichenko, Eds.). Centre for Educational Literature.
5. Korchak, B., Hrynyshyn, O., & Pyshyev, S. (2021). Functional-cost analysis of methods of regeneration of used mineral motor oils. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 4(2), 33–39. <https://doi.org/10.23939/ctas2021.02.033>
6. Чайка, О., & Чайка, Ю. (2009). Порівняльний аналіз методів очищення відпрацьованих олив на Україні та за її межами. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*, (664), 224–228. https://vlp.com.ua/files/55_6.pdf (дата звернення: 10.01.2026).
7. Adesina, L., Saadu, K., & Ajenikoko, G. (2019). Transformer Oil Regeneration as a Panacea for Electric Power Utility Company's Equipment Optimization. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(2), 2160–2167. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B2364.078219>
8. Aboje, A., Jibril, A., Uthman, H., & Bello, N. (2024). Analysis of Acid Options in the Purification of Spent Motor Engine Oil Using Acidified Clay. *Technology in Engineering Management & Applied Science*, XIII(IX), 122–130. <https://doi.org/10.51583/IJLTEMAS.2024.130912>
9. Cabrera-Escobar, C., Moreno-Gutiérrez, J., Rodríguez-Moreno, R., Pájaro-Velázquez, E., Calderay-Cayetano, F., & Durán-Grados, V. (2025). A Review on Global Recovery Policy of Used Lubricating Oils and Their Effects on the Environment and Circular Economy. *Environments*, 12, 135. <https://doi.org/10.3390/environments12050135>
10. Ratiu, S., Mihon, N., Laza, I., & Armioni, M. (2020). A review on the contamination of used engine oil. *Ingineria automobilului*, 57, 20–25. <https://www.researchgate.net/publication/346573076> (application date: 10.01.2026).
11. Aliev, A., Ganieva, S., Smanov, B., Adizov, B., & Rakhimov, B. (2023). Environmentally friendly regeneration of used energy oils. *VIII International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023)*, 390. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339005043>
12. Hassanpour, M. (2021). Transformer Oil Generation and Regeneration Techniques Based on Recent Developments (A Review). *International Journal of Petroleum Technology*, 8, 24–42. doi: <https://doi.org/10.15377/2409-787X.2021.08.3>
13. Korchak, B., Grynshyn, O., Chervinsky, T., Nagursky, A., & Stadnik, V. (2021). Integrated regeneration method for used mineral motor oils. *Chemistry & Chemical Technology*, 15(2), 239–246. <https://doi.org/10.23939/chcht15.02.239>
14. Mu'azu, M., Abdulsalam, S., & El-Nafaty, U. (2024). A. Optimisation of Base Oil Regeneration Using Response Surface Methodology From Spent Lubricating Oil Through Binary Solvent Extraction Process. *Path of Science*, 10(10), 2048–2057. <https://doi.org/10.22178/pos.109-25>
15. Parekh, K., Gaur, R., & Shahabuddin, S. (2021). Recent Advances in Reclamation of Used Lubricant Oil. *Tailored Functional Materials: Select Proceedings of MMETFP 2021 (Springer Proceedings in Materials)*, 15, 273–282. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2572-6_21
16. Ahmed, D., Raad, M., Chali, M., & Bahjat, A. (2024). Purification of Used Lubricating Oils Using Vacuum Distillation. *Journal of Petroleum Research and Studies*, 14(1), 111–130. <http://doi.org/10.52716/jprs.v14i1.766>
17. Ratiu, S., Mihon, N., & Armioni, M. (2020). Study On The Recycling Methods Of Used Engine Oil. *Ingineria automobilului*, 55, 20–22. <https://www.researchgate.net/publication/342899290> (application date: 10.01.2026).
18. Zelenko, Y., Bezovska, M., Kuznetsov, V., & Muntian, A. (2020). Resource Saving and Eco-Friendly Technology for Disposal of Used Railroad Engine Oils. *Middle Pomeranian Scientific Society of the Environment Protection*, 22, 171–180. <https://www.researchgate.net/publication/348430877> (application date: 10.01.2026).
19. Sadraddin, A., & Haji, J. (2022). Regeneration of Engine Used Oils by Solvent Extraction. *Iraqi Journal of Science*, 63(12), 5119–5130. <https://doi.org/10.24996/ijis.2022.63.12.3>
20. Korchak, B., Grynshyn, O., Chervinsky, T., Shapoval, P., & Nagursky, A. (2020). Thermooxidative regeneration of used mineral motor oils. *Chemistry & Chemical Technology*, 14(1), 129–134. <https://doi.org/10.23939/chcht14.01.129>

Дата першого надходження статті до видання: 11.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

О. В. КЛЮЄВ

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри електротехніки та електромеханіки
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0000-0003-4542-3317

О. В. САДОВОЙ

доктор технічних наук, професор
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0000-0001-9739-3661

Ю. В. СОХІНА

кандидат технічних наук, доцент
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0000-0002-4329-5182

СТРУКТУРНИЙ СИНТЕЗ СПОСТЕРІГАЧА ШВИДКОСТІ РОТОРА МАШИНИ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ

Передумовою досліджень, проведених у цій статті, став той факт, що спостерігачі кутової швидкості ротора асинхронних машин, як правило, будуються на основі розімкнених спостерігачів потокозчеплення. Для машин подвійного живлення (МПЖ) вихідними для синтезу обрано рівняння електромагнітних процесів асинхронної машини, записані в ортогональних осях, зв'язаних із ротором. Змінними стану спостерігача є проєкції векторів струму ротора та потокозчеплення статора на осі d , q . На основі цих змінних та їх порівняння з фактичними струмами ротора формується функція адаптації, інтеграл від якої є оцінкою швидкості ротора МПЖ. Під час виведення алгоритму адаптації спостерігача з'являється квадратична форма, матриця якої складається із суми матриці стану та результату її транспонування. Однак результуюча матриця не належить до від'ємно визначених. Тому в роботі для надання спостерігачу потокозчеплення та швидкості властивості глобальної стійкості у рівняння електромагнітних процесів вводяться коригувальні зв'язки за неузгодженостями струмів таким чином, щоб обнулити коефіцієнти матриці квадратичної форми, які не належать головній діагоналі, а сама матриця стає від'ємно визначеною. Це забезпечує спостерігачу потокозчеплення стійкість у цілому. Надалі до нього добудовується функція адаптації як векторний добуток векторів потокозчеплення статора та помилки визначення струму ротора з внутрішнім регулятором, на виході якого отримуємо сигнал оцінки кутової швидкості МПЖ. Таким чином, структура спостерігача складається з підсистеми електромагнітних процесів, підсистеми коригувальних зв'язків та елементів структури, що формують оцінку швидкості. Отриманий спостерігач є замкненим, оскільки всі його змінні стану обчислюються в результаті розв'язання його власних рівнянь динаміки. Вхідними змінними слугують лише напруги статора і ротора, а також струми ротора. Спостерігач формує динамічну петлю зворотного зв'язку для векторної системи керування МПЖ. Стійкість такої системи перевірена чисельним експериментом у режимах підключеного до мережі статора та його закорочення, а також у режимі рекуперативного гальмування при швидкості нижче синхронної.

Ключові слова: Машина подвійного живлення; знаковизначена матриця; структурний синтез; спостерігач потоку і швидкості; функція адаптації; стійкість у цілому.

O. V. KLIUIEV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics
Dniprovsk State Technical University
ORCID: 0000-0003-4542-3317

O. V. SADOVOI

Doctor of Technical Sciences, Professor
Dniprovsk State Technical University
ORCID: 0000-0001-9739-3661



YU. V. SOKHINA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Dniprovsk State Technical University

ORCID: 0000-0002-4329-5182

STRUCTURAL SYNTHESIS OF A ROTOR SPEED OBSERVER FOR A DOUBLY FED MACHINE

The prerequisite for the studies presented in this paper is the fact that observers of the rotor angular speed of induction machines are, as a rule, constructed on the basis of open loop flux linkage observers. For doubly fed machines (DFM) the equations of electromagnetic processes of the induction machine, written in orthogonal axes attached to the rotor, are taken as the basis for synthesis. The state variables of the observer are the d - q projections of the rotor current vectors and the stator flux linkage vectors. From these variables and their comparison with the actual rotor currents an adaptation function is formed, the integral of which represents an estimate of the rotor speed of the DFM. During the derivation of the observer adaptation algorithm, a quadratic form arises whose matrix consists of the sum of the state matrix and its transpose. However the resulting matrix is not negative definite. Therefore in order to impart the property of global stability to the flux linkage and speed observer, corrective feedbacks based on current mismatch signals are introduced into the equations of electromagnetic processes in such a way that the off-diagonal coefficients of the quadratic form matrix are eliminated, and the matrix itself becomes negative definite. This ensures global stability of the flux linkage observer. Subsequently an adaptation function is added to it in the form of the vector product of the stator flux linkage vector and the rotor current estimation error vector, with an internal controller, at the output of which a signal estimating the angular speed of the DFM is obtained. Thus the observer structure consists of an electromagnetic process subsystem, a corrective feedback subsystem and structural elements that form the speed estimate. The resulting observer is closed-loop since all its state variables are obtained as a result of solving its own dynamic equations. The input variables are only the stator and rotor voltages as well as the rotor currents. The observer forms a dynamic feedback loop for the vector control system of the DFM. The stability of such a system is verified by numerical experiments under operating conditions with the stator connected to the grid and with the stator short-circuited, in the regenerative braking mode at speeds below synchronous.

Key words: doubly fed machine; sign-definite matrix; structural synthesis; flux and speed observer; adaptation function; global stability.

Постановка проблеми

У статті [1] запропоновано методику синтезу спостерігача швидкості ротора МПЖ на основі ідентифікатора потокозчеплення статора без коригувальних зв'язків. Спостерігач швидкості синтезований у класі систем з еталонною моделлю (так звані системи MRAS – Model Reference Adaptive System). Алгоритм адаптації в спостерігачі швидкості представляє інтеграл від векторного добутку векторів потокозчеплення статора і помилки визначення вектора струму ротора. У процедурі синтезу спостерігача на основі другого методу О. М. Ляпунова матриця квадратичної форми електромагнітних змінних МПЖ формується на підставі матриці стану МПЖ. Матриця, яку отримують при цьому, не відповідає умовам негативної визначеності квадратичної форми. Якщо цим знехтувати, як зроблено в статті [1], то спостерігач швидкості ротора МПЖ залишається стійким, але не в усіх режимах роботи. При рекуперативному гальмуванні при швидкостях нижче синхронної алгоритм ідентифікації швидкості може втрачати асимптотичну стійкість, починаються автоколивання кутової швидкості ротора і система керування втрачає працездатність. Тому процедурі синтезу спостерігача швидкості ротора МПЖ потрібно додати більшу строгість, що складається в забезпеченні негативної визначеності квадратичної форми електромагнітних змінних МПЖ за рахунок введення до складу матриці цієї квадратичної форми коригувальних зворотних зв'язків. На підставі аналізу літературних джерел виявимо, які типи структур MRAS спостерігачів використовуються в системах векторного бездатчикового керування МПЖ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У статті [2] представлений аналіз спостерігача на базі адаптивної системи з еталонною моделлю (MRAS) для бездатчикового керування автономним генератором подвійного живлення. Структуру спостерігача визначає вигляд функції адаптації, яка вважається на даний момент вже стандартною і являє собою векторний добуток оцінок вектора потокозчеплення статора через еталонну модель напруги статора й адаптивну струмову модель ротора. Подальші дослідження такого спостерігача швидкості підтвердили його придатність не тільки для автономного генератора, а й в інших застосуваннях МПЖ. У [3] замість ПІ-регулятора використовується алгоритм ковзного режиму, коли помилка оцінювання, як різниця сигналів еталонної й адаптивної моделей, прямує до нуля при влученні на поверхню ковзання. У [4] для традиційного векторного керування реалізований адаптивний спостерігач вектора потокозчеплення статора з визначенням положення ротора на основі обмірюваних фазних струмів статора і ротора. Через неточність параметрів оцінка положення ротора супроводжується помилкою, що розглядається як додатковий параметр машини і пропонується процедура компенсації цієї помилки алгоритмом, синтезованим на основі теорії стійкості Ляпунова. У статті [5] спостерігач швидкості МПЖ із такою ж структурою досліджується в умовах симетричних і несиметричних провалів напруги статора. У [6] викладений

алгоритм бездатчикового керування швидкістю синхронним двигуном з постійними магнітами. Вимірюється тільки струм у ланці постійного струму транзисторного інвертора, що живить статорні обмотки синхронного двигуна. Адаптивний алгоритм використовує тільки моментоутворюючу складову струму статора по осі q , оскільки проекція на вісь d у всіх режимах утримується рівною нулю. У більшості MRAS порівнюються струми або потокозчеплення. У статті [7] за основу узят активна потужність, що в еталонній моделі обчислюється через струми і напруги статора, а в адаптивній моделі активна потужність обчислюється через параметри ротора, у які входить і швидкість ротора. Замість ПІ-регулятора у функції адаптації використовується гістерезисне реле, на вхід якого подається різниця обмірюваної й оціненої активної потужності пропорційної швидкості ротора. Реле стійко працює в ковзному режимі, коли різниця обмірюваної й обчисленої активних потужностей на вході реле знаходиться в малій околиці нуля. У спостерегачах MRAS ПІ-регулятор може розгойдувати систему керування, якщо параметри МПЖ починають відрізнятися від параметрів спостерегача. Як відомо, помилка між еталонною й адаптивною моделями використовується алгоритмом адаптації. У [8] класичний ПІ-регулятор у функції адаптації замінюється H_∞ – контролером, щоб підвищити робастність спостерегача, коли зберігається не тільки стійкість, але і задовільна якість спостереження за швидкістю при найгірших можливих параметричних збуреннях у системі керування.

Формулювання мети дослідження

Огляд літературних джерел показує, що пошуки нових структур MRAS спостерегачів для МПЖ проводяться в напрямках розроблення нових функцій адаптації як різних комбінацій векторів у складі їх векторного добутку або застосування різних типів регуляторів від похибки нев'язання, що розраховується відповідним чином. Завдання статті полягає в дослідженні динаміки МПЖ із векторною системою керування, до складу якої входить спостерегач швидкості ротора з відомою функцією адаптації, реалізованою за вектором потокозчеплення статора, але зі структурними змінами, зумовленими введенням коригувальних зв'язків у рівняння електромагнітних змінних спостерегача швидкості.

Викладення основного матеріалу дослідження

Система рівнянь електромагнітних контурів МПЖ наступна [1]:

$$\begin{aligned} pI_{rd} &= -\frac{(R_r + k_s^2 R_s)L_s}{L_s L_r - L_m^2} I_{rd} + \frac{k_s R_s}{L_s L_r - L_m^2} \Psi_{sd} - \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \omega \Psi_{sq} + \frac{L_s u_{rd} - L_m u_{sd}}{L_s L_r - L_m^2}; \\ pI_{rq} &= -\frac{(R_r + k_s^2 R_s)L_s}{L_s L_r - L_m^2} I_{rq} + \frac{k_s R_s}{L_s L_r - L_m^2} \Psi_{sq} + \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \omega \Psi_{sd} + \frac{L_s u_{rq} - L_m u_{sq}}{L_s L_r - L_m^2}; \\ p\Psi_{sd} &= -\frac{R_s}{L_s} \Psi_{sd} + k_s R_s I_{rd} + \omega \Psi_{sq} + u_{sd}; \\ p\Psi_{sq} &= -\frac{R_s}{L_s} \Psi_{sq} + k_s R_s I_{rq} - \omega \Psi_{sd} + u_{sq}. \end{aligned} \quad (1)$$

Рівняння електромагнітних контурів МПЖ (1) у матричній формі мають вигляд

$$p \begin{pmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \\ \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_{11} & 0 & a_{13} & -a_{14}\omega \\ 0 & -a_{22} & a_{23}\omega & a_{24} \\ a_{31} & 0 & -a_{33} & \omega \\ 0 & a_{42} & -\omega & -a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \\ \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & -b_{13} & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 & -b_{24} \\ 0 & 0 & b_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{rd} \\ u_{rq} \\ u_{sd} \\ u_{sq} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де

$$\begin{aligned} a_{11} = a_{22} &= \frac{(R_r + k_s^2 R_s)L_s}{L_s L_r - L_m^2}; & a_{13} = a_{24} &= \frac{k_s R_s}{L_s L_r - L_m^2}; & a_{14} = a_{23} &= \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2}; \\ a_{31} = a_{42} &= k_s R_s; & a_{33} = a_{44} &= \frac{R_s}{L_s}; & b_{11} = b_{22} &= \frac{L_s}{L_s L_r - L_m^2}; \\ b_{13} = b_{24} &= \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2}; & b_{33} = b_{44} &= 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Рівняння (2) можна записати так:

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU, \quad (4)$$

де $X = (I_{rd} \ I_{rq} \ \Psi_{sd} \ \Psi_{sq})^T$; $U = (u_{rd} \ u_{rq} \ u_{sd} \ u_{sq})^T$;

$$A = \begin{pmatrix} -a_{11} & 0 & a_{13} & -a_{14}\omega \\ 0 & -a_{22} & a_{23}\omega & a_{24} \\ a_{31} & 0 & -a_{33} & \omega \\ 0 & a_{42} & -\omega & -a_{44} \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & -b_{13} & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 & -b_{24} \\ 0 & 0 & b_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

У матриці стану A можуть діяти параметричні збурення і координатне збурення за швидкістю ω . Тому для забезпечення стійкості спостерігача його доцільно синтезувати разом з матрицею коригувальних коефіцієнтів за відхиленнями струмів. Запишемо рівняння спостерігача в наступному вигляді

$$\frac{d\hat{X}}{dt} = \hat{A}\hat{X} + BU + G(\hat{I}_r - I_r) = \hat{A}\hat{X} + BU + GC(\hat{X} - X), \quad (6)$$

де $G = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \\ g_{31} & g_{32} \\ g_{41} & g_{42} \end{pmatrix}$ – матриця коефіцієнтів зворотних зв'язків за струмами; $C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ – матриця зіставлення

змінних стану з тими змінними, за якими замикаються зворотні зв'язки; $I_r = (I_{rd} \ I_{rq})^T$, $\hat{I}_r = (\hat{I}_{rd} \ \hat{I}_{rq})^T$ – вектори-стовпці проєкцій вектора струму ротора на осі d,q та їх оцінок; $\hat{X} = (\hat{I}_{rd} - I_{rd} \ \hat{I}_{rq} - I_{rq} \ \hat{\Psi}_{sd} - \Psi_{sd} \ \hat{\Psi}_{sq} - \Psi_{sq})^T$ – вектор-стовпець відхилень оцінок змінних стану МПЖ від їх справжніх значень.

Помилка оцінювання змінних стану представляє рівняння збуреного руху спостерігача

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{X}}{dt} - \frac{dX}{dt} = \frac{de}{dt} &= \hat{A}\hat{X} + BU + GC(\hat{X} - X) - AX - BU = (A + \Delta A)\hat{X} - AX + GC(\hat{X} - X) = \\ &= A(\hat{X} - X) + \Delta A\hat{X} + GC(\hat{X} - X) = Ae + GCe + \Delta A\hat{X} = (A + GC)e + \Delta A\hat{X}, \end{aligned} \quad (7)$$

де $e = \hat{X} - X$ – вектор відхилень обчислених змінних від їх фактичних значень.

Якщо покласти, що матриця прирощень ΔA обумовлена тільки відхиленнями обчислених спостерігачем значень швидкості від їх обмірюваних значень, то можна записати

$$\Delta A = \hat{A} - A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -a_{14}\Delta\omega \\ 0 & 0 & a_{23}\Delta\omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta\omega \\ 0 & 0 & -\Delta\omega & 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

де $\Delta\omega = \hat{\omega} - \omega$; $\omega, \hat{\omega}$ – кутова швидкість ротора та її оцінка, визначена спостерігачем.

Введемо наступну позитивно визначену квадратичну форму

$$V = e^T e + \frac{\Delta\omega^2}{\lambda} = \Delta I_{rd}^2 + \Delta I_{rq}^2 + \Delta \Psi_{sd}^2 + \Delta \Psi_{sq}^2 + \frac{\Delta\omega^2}{\lambda} > 0, \quad \lambda > 0. \quad (9)$$

Подальші викладення будемо проводити виходячи з того, що вираз (9) є функцією Ляпунова для спостерігача (6).

Знаходимо повну похідну за часом від функції (9) на траєкторіях збуреного руху спостерігача (7):

$$\frac{dV}{dt} = \left(\frac{de^T}{dt} \right) e + e^T \left(\frac{de}{dt} \right) + \frac{2\Delta\omega}{\lambda} \frac{d\Delta\omega}{dt} = \left(\frac{de^T}{dt} \right) e + e^T \left(\frac{de}{dt} \right) + \frac{2\Delta\omega}{\lambda} \frac{d\Delta\omega}{dt}. \quad (10)$$

З перетворень (7) випливає

$$\frac{de}{dt} = (A + GC)e + \Delta A\hat{X} \Rightarrow \frac{de^T}{dt} = e^T (A + GC)^T + (\Delta A\hat{X})^T. \quad (11)$$

Підставимо (11) у (10) і прийнемо, що швидкість ротора змінюється істотно повільніше, ніж її оцінка:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= e^T (A + GC)^T e + (\Delta A\hat{X})^T e + e^T (A + GC)e + e^T (\Delta A\hat{X}) + \frac{2\Delta\omega}{\lambda} \frac{d\hat{\omega}}{dt} = \\ &= e^T \left[(A + GC)^T + (A + GC) \right] e + 2e^T \Delta A\hat{X} + \frac{2\Delta\omega}{\lambda} \frac{d\hat{\omega}}{dt}. \end{aligned} \quad (12)$$

У (12) є доданки, для яких виконується умова

$$(\Delta A \hat{X})^T e = e^T (\Delta A \hat{X}) = \begin{pmatrix} \Delta I_{rd} & \Delta I_{rq} & \Delta \Psi_{sd} & \Delta \Psi_{sq} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -a_{14} \Delta \omega \\ 0 & 0 & a_{23} \Delta \omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta \omega \\ 0 & 0 & -\Delta \omega & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{I}_{rd} \\ \hat{I}_{rq} \\ \hat{\Psi}_{sd} \\ \hat{\Psi}_{sq} \end{pmatrix} =$$

$$= -a_{14} \hat{\Psi}_{sq} \Delta I_{rd} \Delta \omega + a_{23} \hat{\Psi}_{sd} \Delta I_{rq} \Delta \omega + \hat{\Psi}_{sq} \Delta \Psi_{sd} \Delta \omega - \hat{\Psi}_{sd} \Delta \Psi_{sq} \Delta \omega. \quad (13)$$

Розіб'ємо вираз (12) на два доданки

$$\frac{dV}{dt} = S_1 + S_2, \quad (14)$$

де $S_1 = e^T \left[(A + GC)^T + (A + GC) \right] e$; $S_2 = 2e^T \Delta A \hat{X} + \frac{2\Delta \omega}{\lambda} \frac{d\hat{\omega}}{dt}$.

Для стійкості спостерігача (6) функція (14) повинна бути негативно визначеною, що буде виконуватися, якщо забезпечити негативну визначеність квадратичній формі S_1 , а вираз S_2 дорівнювати нулю.

Якщо прийняти S_1 рівним нулю, то з урахуванням виразу (13) одержимо наступне рівняння

$$S_2 = 2e^T \Delta A \hat{X} + \frac{2\Delta \omega}{\lambda} \frac{d\hat{\omega}}{dt} = 2\Delta \omega \left(-a_{14} \hat{\Psi}_{sq} \Delta I_{rd} + a_{23} \hat{\Psi}_{sd} \Delta I_{rq} + \hat{\Psi}_{sq} \Delta \Psi_{sd} - \hat{\Psi}_{sd} \Delta \Psi_{sq} + \frac{1}{\lambda} \frac{d\hat{\omega}}{dt} \right) = 0. \quad (15)$$

Вирази в дужках дорівнюємо нулю і розв'язанням отриманого рівняння знаходимо алгоритм ідентифікації швидкості

$$\hat{\omega} = \lambda \int \left[a_{14} \hat{\Psi}_{sq} (\hat{I}_{rd} - I_{rd}) - a_{23} \hat{\Psi}_{sd} (\hat{I}_{rq} - I_{rq}) + \hat{\Psi}_{sd} (\hat{\Psi}_{sq} - \Psi_{sq}) - \hat{\Psi}_{sq} (\hat{\Psi}_{sd} - \Psi_{sd}) \right] dt, \quad (16)$$

який з урахуванням співвідношення $a_{14} = a_{23}$, може бути записаний інакше

$$\hat{\omega} = -\lambda a_{23} \int \left| \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{sd} & \hat{\Psi}_{sq} \\ \Delta I_{rd} & \Delta I_{rq} \end{pmatrix} \right| dt + \lambda \int \left| \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{sd} & \hat{\Psi}_{sq} \\ \Delta \Psi_{sd} & \Delta \Psi_{sq} \end{pmatrix} \right| dt = -\lambda a_{23} \int [\hat{\Psi}_s \times \Delta I_r] dt + \lambda \int [\hat{\Psi}_s \times \Delta \Psi_s] dt. \quad (17)$$

З формули (17) випливає, що алгоритм ідентифікації швидкості складається із суми інтегралів від векторних добутоків вектора оцінки поточозчеплення статора на вектори відхилень оцінок струму ротора і поточозчеплення статора від їх фактичних значень.

Для стійкої роботи алгоритму (17) одночасно з ним повинна бути забезпечена негативна визначеність квадратичної форми S_1 . При заміні кутової швидкості ротора ω її оцінкою $\hat{\omega}$ і з урахуванням виразу (3), матриця квадратичної форми S_1 приймає вигляд

$$K = (A + GC)^T + (A + GC) =$$

$$= \begin{pmatrix} -2a_{11} + 2g_{11} & g_{12} + g_{21} & a_{13} + a_{31} + g_{31} & -a_{23}\hat{\omega} + g_{41} \\ g_{21} + g_{12} & -2a_{11} + 2g_{22} & a_{23}\hat{\omega} + g_{32} & a_{13} + a_{31} + g_{42} \\ a_{31} + a_{13} + g_{31} & a_{23}\hat{\omega} + g_{32} & -2a_{33} & 0 \\ -a_{23}\hat{\omega} + g_{41} & a_{31} + a_{13} + g_{42} & 0 & -2a_{33} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Якщо матрицю K зробити діагональною, то вона буде відповідати умовам Сильвестра негативної визначеності квадратичної форми S_1 . У силу симетричності вихідної матриці K коригувальних коефіцієнтів g_{ij} достатньо, щоб зробити її діагональною. Виходячи з цієї умови, потрібно покласти рівними нулю коефіцієнти в рівняннях струмів

$$g_{11} = g_{22} = g_{12} = g_{21} = 0. \quad (19)$$

Властивість діагональності матриці (18) буде забезпечено при виконанні наступних умов:

$$K_{13} = K_{31} = a_{13} + a_{31} + g_{31} = 0; \quad (20)$$

$$K_{24} = K_{42} = a_{13} + a_{31} + g_{42} = 0; \quad (21)$$

$$K_{23} = K_{32} = a_{23}\hat{\omega} + g_{32} = 0; \quad (22)$$

$$K_{14} = K_{41} = -a_{23}\hat{\omega} + g_{41} = 0. \quad (23)$$

З рівностей (20) і (21) випливає

$$g_{31} = g_{42} = -a_{13} - a_{31}. \quad (24)$$

З умов (22) і (23) буде

$$\mathbf{g}_{41} = -\mathbf{g}_{32} = a_{23}\hat{\omega}. \quad (25)$$

Система рівнянь (6), розв'язувана в реальному часі, є спостерігачем вектора потокозчеплення статора, у який вводяться коригувальні зв'язки за неузгодженостями струмів для додання спостерігачу стійкості при дії в ньому або в МПЖ параметричних збурень. Запишемо рівняння спостерігача (6) у скалярній формі з урахуванням формул (24), (25) і матриць (5) за умови, що замість значення швидкості ротора в матриці стану A використовується оцінка кутової швидкості ротора МПЖ із додаванням у систему рівнянь алгоритму ідентифікації швидкості (16):

$$\begin{aligned} p\hat{I}_{rd} &= -a_{11}\hat{I}_{rd} + a_{13}\hat{\Psi}_{sd} - a_{14}\hat{\omega}\hat{\Psi}_{sq} + b_{11}u_{rd} - b_{13}u_{sd}; \\ p\hat{I}_{rq} &= -a_{22}\hat{I}_{rq} + a_{24}\hat{\Psi}_{sq} + a_{23}\hat{\omega}\hat{\Psi}_{sd} + b_{22}u_{rq} - b_{24}u_{sq}; \\ p\hat{\Psi}_{sd} &= a_{31}\hat{I}_{rd} - a_{33}\hat{\Psi}_{sd} + \hat{\omega}\hat{\Psi}_{sq} + (a_{13} + a_{31})(\hat{I}_{rd} - \hat{I}_{rd}) + a_{23}\hat{\omega}(\hat{I}_{rq} - \hat{I}_{rq}) + b_{33}u_{sd}; \\ p\hat{\Psi}_{sq} &= a_{42}\hat{I}_{rq} - a_{44}\hat{\Psi}_{sq} - \hat{\omega}\hat{\Psi}_{sd} - a_{23}\hat{\omega}(\hat{I}_{rd} - \hat{I}_{rd}) + (a_{13} + a_{31})(\hat{I}_{rq} - \hat{I}_{rq}) + b_{44}u_{sq}. \\ \hat{\omega} &= \lambda \int \left[a_{23}\hat{\Psi}_{sd}(\hat{I}_{rq} - \hat{I}_{rq}) - a_{14}\hat{\Psi}_{sq}(\hat{I}_{rd} - \hat{I}_{rd}) + \hat{\Psi}_{sd}(\hat{\Psi}_{sq} - \hat{\Psi}_{sq}) - \hat{\Psi}_{sq}(\hat{\Psi}_{sd} - \hat{\Psi}_{sd}) \right] dt. \end{aligned} \quad (26)$$

Спостерігач (26) опорного вектора потокозчеплення статора і кутової швидкості ротора можна використовувати у векторних системах керування МПЖ із релейними регуляторами, синтезованими в базисі перших похідних. У такій системі керування релейний регулятор кутової швидкості ротора МПЖ використовує жорсткий зворотний зв'язок за оцінкою кутової швидкості і зворотний зв'язок за першою похідною від оцінки кутової швидкості.

Другий доданок в алгоритмі ідентифікації (17), що містить векторний добуток векторів оцінки вектора потокозчеплення статора і помилки ідентифікації потокозчеплення статора, потребує виміру проекцій вектора потокозчеплення статора $\hat{\Psi}_{sd}, \hat{\Psi}_{sq}$, що представляє складну технічну задачу і ставить під сумнів доцільність розв'язання самої задачі синтезу спостерігача. Тому перевірялася можливість зневаги другим доданком в алгоритмі (17) з метою доказу достатності урахування векторного добутку векторів за неузгодженістю струмів як легко вимірюваних величин, для коректної ідентифікації кутової швидкості ротора МПЖ. Також для підвищення швидкодії спостерігача додається пропорційна складова від функції адаптації. Таким чином, методом математичного моделювання перевірялася працездатність спостерігача (26) з алгоритмом ідентифікації швидкості, який має вигляд

$$\hat{\omega} = \left(\tau + \frac{\lambda}{p} \right) \left[\hat{\Psi}_{sd}(\hat{I}_{rq} - \hat{I}_{rq}) - \hat{\Psi}_{sq}(\hat{I}_{rd} - \hat{I}_{rd}) \right], \quad (27)$$

у якому унаслідок того, що $a_{14} = a_{23}$, зазначені коефіцієнти винесені з під операції інтегрування і включені до складу параметра λ .

Структурна схема спостерігача кутової швидкості ротора МПЖ, побудована за рівняннями (26), (27), представлена на рис. 1. Спостерігач п'ятого порядку сполучає в собі ідентифікацію вектора потокозчеплення статора і швидкості ротора. Спостерігач побудований на основі рівнянь електромагнітних процесів у МПЖ, записаних в ортогональних осях координат d, q . Вхідними вимірюваними величинами є проекції векторів напруг статора і ротора, а також проекції вектора струму ротора на осі d, q . Структура, що відображає електромагнітні процеси, доповнюється коригувальними зв'язками за неузгодженостями оцінювання струмів і підсистемою обчислення оцінки кутової швидкості ротора. Для потреб векторного керування спостерігач визначає оцінки проекцій опорного вектора потокозчеплення статора $\hat{\Psi}_{sd}, \hat{\Psi}_{sq}$, що надходять далі у векторний аналізатор, і оцінку швидкості ротора для замикання за нею та її похідною негативних зворотних зв'язків у складі функції переключення релейного регулятора кутової швидкості ротора МПЖ.

У системі векторного керування МПЖ регулювання проводилося за двома каналами керування: реактивної потужності зі стабілізацією струму намагнічування й активної потужності з зовнішнім релейним регулятором швидкості і підпорядкованим йому регулятором активної складової струму ротора. Струм намагнічування утримується на постійному рівні, при якому коефіцієнт потужності статорного кола дорівнює одиниці. Динаміка електроприводу досліджувалася за допомогою програми написаної в математичному середовищі Matlab, у якій за вихідні бралися технічні дані АМ з фазним ротором: $P_n = 11$ кВт, $U_{sn} = 380$ В, $n_c = 1500$ об/хв. У колі зворотного зв'язку системи керування включений спостерігач потокозчеплення і швидкості, динаміка якого описується системою рівнянь (26), (27) і структурною схемою на рис. 1. Перехідні процеси змінних, що характеризують роботу спостерігача, показані на рис. 2. Спершу статорні обмотки закорочені з живленням ротора від перетворювача частоти, завдання на швидкість дорівнює нулю, а струм намагнічування утримується на рівні, при якому потокозчеплення статора аперіодично зростає до номінального значення. Далі в 0.15 с у каналі активної потужності дається завдання на швидкість, що дорівнює 90 % синхронної швидкості. Починається пуск МПЖ із виходом швидкості на рівень завдання за допомогою релейного регулятора, у якого у функції переключення використовуються негативні

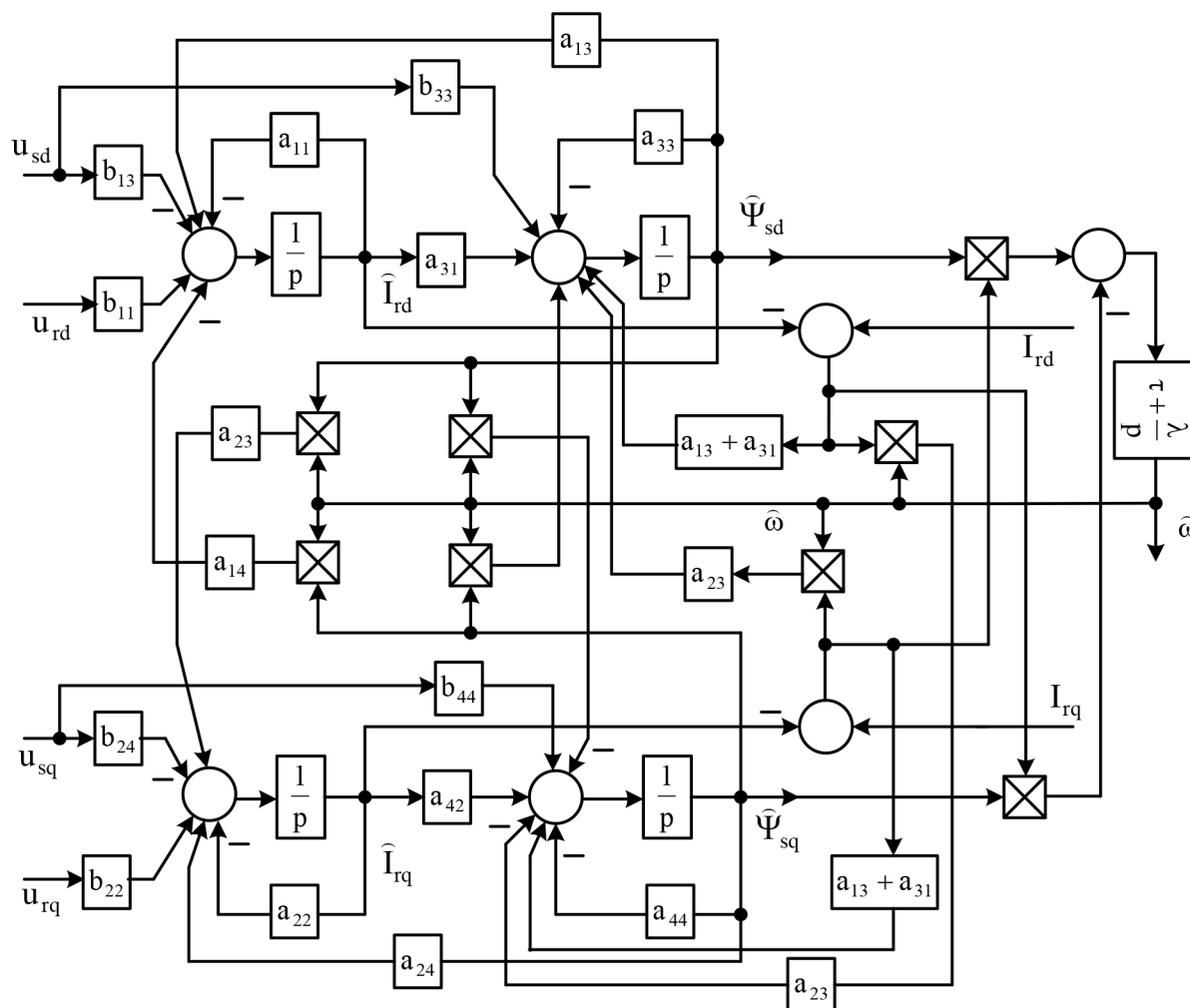


Рис. 1. Структурна схема спостерігача швидкості ротора МПЖ

зворотні зв'язки за оцінкою швидкості та її першою похідною з виходу спостерігача. Після того як пуск закінчився і швидкість стабілізована на рівні завдання, статор МПЖ у 0.45 с підключається до мережі, що супроводжується швидко гаснучими коливаннями модуля вектора потокозчеплення статора. Параметри ПІ-регулятора в складі спостерігача приймалися наступними: $\tau = 20$, $\lambda = 20\,000$. Спостерігач зберігає стійкість при достатньо великих інтегральних складових регулятора у своєму складі, що необхідно для забезпечення високої точності ідентифікації потокозчеплення і швидкості, а також для збереження стійкості системи керування при підключенні статора до мережі, коли спостерігачу потрібно устигати відслідковувати значення модуля вектора потокозчеплення статора. На діаграмах рис. 2 також показані активна складова струму ротора й електромагнітний момент. На вал МПЖ діє вентиляторний момент навантаження. У 0.6 с починається рекупераційне гальмування МПЖ до швидкості 50 рад/с. Найбільша динамічна помилка ідентифікації швидкості (0.57 %) була зареєстрована при підключенні статора до мережі, коли ротор обертається з малими ковзаннями. Помилка ідентифікації модуля вектора потокозчеплення статора дорівнює 0.61 %. На графіках рис. 2 синім кольором представлені графіки перехідних процесів фактичних величин швидкості і потокозчеплення статора, а червоним кольором – обчислені спостерігачем значення.

Висновки

У процесі синтезу спостерігача потокозчеплення статора і кутової швидкості ротора МПЖ була виявлена необхідність введення до складу рівнянь електромагнітних процесів спостерігача коригувальних зв'язків за неузгодженостями струмів для забезпечення негативної визначеності повної похідної за часом від функції Ляпунова на траєкторіях збуреного руху спостерігача в складі релейної векторної системи керування МПЖ. Коефіцієнти коригувальних зв'язків вийшли залежними від швидкості, що у рівняннях спостерігача для додання йому замкнутості замінені її оцінкою. Стійкість спостерігача з отриманою структурою і досить висока точність ідентифікації потоку і швидкості перевірені методом математичного моделювання в різних режимах роботи МПЖ: регулювання швидкості при закороченому статорі і при підключенні його до мережі, при рекупераційному гальмуванні зі швидкостями нижче синхронної.

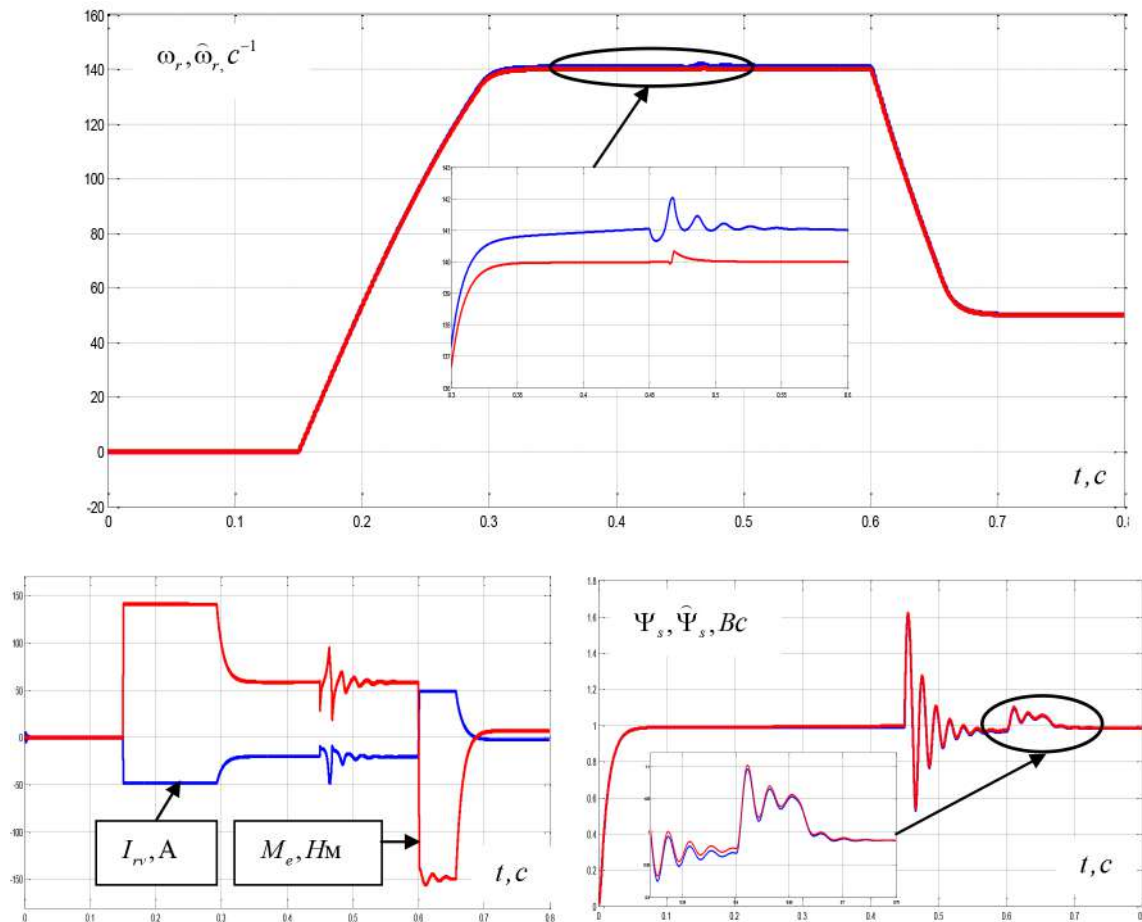


Рис. 2. Перехідні процеси в МПЖ з спостерігачем потокозчеплення статора і швидкості ротора у векторній системі керування

Список використаної літератури

1. Ключев О. В. Спостерігач швидкості в системі векторного керування машиною подвійного живлення. *International scientific journal «Internauka»*. 2023. № 3(137), С. 50 – 57. DOI: 10.25313/2520-2057-2023-3-8619
2. Roberto Cardenas, Ruben Pena, Jose Proboste, Greg Asher, Jon Clare, MRAS Observer for Sensorless Control of Standalone Doubly Fed Induction Generators/*IEEE Transactions on energy conversion*. 2005. Volume 20. No. 4, P. 710-718. DOI: 10.1109/TEC.2005.847965
3. Djamilia Cherifi, Yahia Miloud, Robust Speed-sensorless Vector Control of Doubly Fed Induction Motor Drive Using Sliding Mode Rotor Flux Observer/*International Journal of Applied Power Engineering*. 2018. Volume 7, No. 3, P. 235-250. DOI: 10.11591/ijape.v7.i3.pp235-250
4. Gianluca Brando, Adolfo Dannier, Ivan Spina, Performance Analysis of a Full Order Sensorless Control Adaptive Observer for Doubly-Fed Induction Generator in Grid Connected Operation/*Energies* 2021. 14(5), 1254. DOI: 10.3390/en14051254
5. Rogerio Vani Jacomini, Edson Bim, Sensorless Rotor Position Based on MRAS Observer for Doubly Fed Induction Generator/*2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. 2015. DOI: 10.1109/COBEP.2015.7420139
6. Jyoti Agrawal, Sanjay Bodkhe, Speed Sensorless Vector Controlled SMPMSM Drive Based on Modified MRAS with Single Current Sensor/*IETE Journal of Research*. 2019. P. 902-916. DOI: 10.1080/03772063.2019.1627915
7. Ajabi-Farshbaf R., Azizian M. R., Yousefizad V., A Novel Algorithm for Rotor Speed Estimation of DFIGs Using Machine Active Power based on MRAS Observer/*Journal of Operation and Automation in Power Engineering*. 2018. Volume 6, No.1, P. 61–68. DOI: 10.22098/joape.2018.2132.1200
8. Saihi Lakhdar, Bakou Youcef, Ferroudji Fateh, Abdelkader Hadidi, Oulimar Ibrahim, A Hybrid H_∞ -MRAS Observer of Wind Turbines Conversion Systems based on DFIG/*Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development*. 2022. Volume 4, No. 1, P. 101–110. DOI: 10.46657/ajresd.2022.4.1.10

References

1. Kliuiev, O. V. (2023). Sposterihach shvydkosti v systemi vektornoho keruvannia mashynoiu podviinoho zhyvlennia [Speed observer in the vector system control of the doubly fed machine] *International scientific journal "Internauka"*. № 3(137), P. 50–57. DOI: 10.25313/2520-2057-2023-3-8619 [in Ukrainian]
2. Roberto Cardenas, Ruben Pena, Jose Proboste, Greg Asher, & Jon Clare. (2005). MRAS Observer for Sensorless Control of Standalone Doubly Fed Induction Generators/*IEEE Transactions on energy conversion*. Volume 20. No. 4, P. 710–718. DOI: 10.1109/TEC.2005.847965
3. Djamila Cherifi, & Yahia Miloud. (2018). Robust Speed-sensorless Vector Control of Doubly Fed Induction Motor Drive Using Sliding Mode Rotor Flux Observer/ *International Journal of Applied Power Engineering*. Volume 7. No. 3, P. 235–250. DOI: 10.11591/ijape.v7.i3.pp235-250
4. Gianluca Brando, Adolfo Dannier, & Ivan Spina. (2021). Performance Analysis of a Full Order Sensorless Control Adaptive Observer for Doubly-Fed Induction Generator in Grid Connected Operation/*Energies* 2021. 14(5), 1254. DOI: 10.3390/en14051254
5. Rogerio Vani Jacomini, & Edson Bim. (2015). Sensorless Rotor Position Based on MRAS Observer for Doubly Fed Induction Generator/*2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. DOI: 10.1109/COBEP.2015.7420139
6. Jyoti Agrawal, & Sanjay Bodkhe. (2019). Speed Sensorless Vector Controlled SMPMSM Drive Based on Modified MRAS with Single Current Sensor/*IETE Journal of Research*. P. 902–916. DOI: 10.1080/03772063.2019.1627915
7. Ajabi-Farshbaf, R., Azizian, M. R., & Yousefizad, V. (2018). A Novel Algorithm for Rotor Speed Estimation of DFIGs Using Machine Active Power based on MRAS Observer/*Journal of Operation and Automation in Power Engineering*. Volume 6, No. 1, P. 61–68. DOI: 10.22098/joape.2018.2132.1200
8. Saihi Lakhdar, Bakou Youcef, Ferroudji Fateh, Abdelkader Hadidi, & Oulimar Ibrahim. (2022). A Hybrid H_{∞} -MRAS Observer of Wind Turbines Conversion Systems based on DFIG/*Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development*. Volume 4, No. 1, P. 101–110. DOI: 10.46657/ajresd.2022.4.1.10

Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

А. А. КОЧИНА

кандидат технічних наук,
доцент кафедри транспортних систем і логістики
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
ORCID: 0000-0001-8377-4770

І. С. НАГЛЮК

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри організації та безпеки дорожнього руху
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
ORCID: 0000-0001-9411-4479

Л. С. АБРАМОВА

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри організації та безпеки дорожнього руху
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
ORCID: 0000-0003-1182-9618

С. А. САХНО

здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти
кафедри транспортних систем і логістики
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
ORCID: 0009-0002-7874-3376

МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ МОДЕЛІ ТРАНСПОРТНОГО ПОПИТУ НА ПЕРЕСУВАННЯ ПАСАЖИРІВУ ПРИМІСЬКОМУ СПОЛУЧЕННІ НА ОСНОВІ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РОЗПОДІЛУ ВІДСТАНЕЙ ПОЇЗДОК

Мета дослідження полягає у формалізації методики формування матриць пасажирських кореспонденцій у приміському сполученні у межах інтервальної концепції моделювання транспортного попиту на пересування пасажирів громадським транспортом з урахуванням статистичних закономірностей розподілу відстаней поїздок.

Наукова новизна полягає у розробленні підходу до формування матриць пасажирських кореспонденцій, який передбачає використання ймовірнісних інтервалів дальності пересувань, розрахунок частки пасажирів у межах кожного інтервалу та формування системи обмежень для розподілу кореспонденцій між транспортними районами з урахуванням емпіричного розподілу відстаней поїздок.

Результати дослідження включають розроблення алгоритму генерації матриць пасажирських кореспонденцій, які задовольняють обмеженням щодо місткостей транспортних районів та відтворюють фактичний розподіл дальності пересувань. Алгоритм генерації матриць пасажирських кореспонденцій реалізовано у програмному середовищі MS Excel із застосуванням генератора випадкових чисел і процедур перевірки відповідності отриманих матриць кореспонденцій емпіричним частотам розподілу відстаней поїздок. Запропонована методика забезпечує звуження множини можливих станів матриць до тих, що узгоджуються з реальними просторово-часовими характеристиками транспортного попиту.

Висновки полягають у тому, що запропонований підхід підвищує обґрунтованість формування матриць пасажирських кореспонденцій у приміському сполученні, забезпечує більш достовірне відтворення фактичних закономірностей переміщень населення та створює надійну основу для прогнозування транспортного попиту й оцінювання сценаріїв розвитку прилеглих до міських територій.

Ключові слова: громадський транспорт, матриця пасажирських кореспонденцій, моделювання транспортного попиту, пасажиропотоки, приміське сполучення, розподіл відстаней поїздок.

A. A. KOCHINA

PhD in Transport Systems,
Associate Professor at the Department of Transport Systems and Logistics
Kharkiv National Automobile and Highway University
ORCID: 0000-0001-8377-4770



I. S. NAHLIUK

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Road Traffic Management and Safety
Kharkiv National Automobile and Highway University
ORCID: 0000-0001-9411-4479

L. S. ABRAMOVA

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Road Traffic Management and Safety
Kharkiv National Automobile and Highway University
ORCID: 0000-0003-1182-9618

S. A. SAKHNO

Postgraduate Student at the Department of Transport Systems and Logistics
Kharkiv National Automobile and Highway University
ORCID: 0009-0002-7874-3376

METHODOLOGY FOR FORMING A TRANSPORT DEMAND MODEL FOR PASSENGER MOBILITY IN SUBURBAN TRANSPORT BASED ON TRIP DISTANCE DISTRIBUTION PATTERNS

The purpose of the study is to formalize a methodology for constructing passenger origin–destination matrices in suburban transport within the framework of the interval concept of public transport demand modeling, taking into account statistical patterns in trip distance distribution.

Scientific novelty lies in the development of an approach to forming passenger origin–destination matrices that involves the use of probabilistic intervals of travel distance, calculation of the share of passengers within each interval, and the formation of a system of constraints for allocating correspondences between transport zones based on the empirical distribution of trip distances.

Research results include the development of an algorithm for generating passenger origin–destination matrices that satisfy constraints on transport zone capacities and reproduce the actual distribution of travel distances. The algorithm is implemented in the MS Excel software environment using a random number generator and procedures for verifying the compliance of generated correspondence matrices with empirical frequencies of trip distance distribution. The proposed methodology ensures a reduction in the set of possible matrix states to those consistent with real spatial and temporal characteristics of transport demand.

Conclusions indicate that the proposed approach improves the validity of forming passenger origin–destination matrices in suburban transport, ensures more accurate reproduction of actual mobility patterns of the population, and provides a reliable basis for forecasting transport demand and evaluating development scenarios for areas adjacent to urban territories.

Key words: public transport, passenger origin–destination matrix, transport demand modeling, passenger flows, suburban transport, trip distance distribution.

Постановка проблеми

Формування моделей транспортного попиту на пересування пасажирів громадським транспортом (ГТ) є дуже складною задачею у межах розробки прогнозних транспортних моделей. До цього слід також додати відсутність надійних методик розробки матриць пасажирських кореспонденцій (МПК), які є відображенням транспортного попиту, на прикладі приміського сполучення. На відміну від методів, що використовуються для побудови загальноміських МПК, для приміського сполучення, ця задача зводиться до отримання середньозваженої МПК, яка, у більшості випадків, використовується для оцінювання рівня якості транспортного обслуговування пасажирів у приміському сполученні ГТ [1–3].

Застосування закономірностей розподілу дальності пересувань у приміському сполученні в межах інтервальної концепції (ІК) моделювання транспортного попиту може стати надійною основою для удосконалення методів визначення потреб у пасажирських перевезеннях ГТ. Такий підхід забезпечує можливість безпосереднього врахування параметрів встановлених закономірностей відстаней поїздок під час розподілу кореспонденцій між клітинками МПК, що дозволяє формувати матриці, які узгоджуються з фактичними просторово-часовими характеристиками переміщень [1–4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Формування попиту на пасажирські перевезення є складним багатофакторним процесом, що залежить від соціально-економічних, просторових, інфраструктурних і поведінкових характеристик населення. Особливої актуальності ця проблема набуває у сфері міського та приміського сполучення, де інтенсивність переміщень формується під впливом процесів розселення, територіальної організації міста та рівня розвитку транспортної системи [1, 2]. До того ж, на величину транспортного попиту впливає безліч факторів як внутрішнього, так і зовнішнього

характеру. Якщо розглядати особливості приміського сполучення, то серед основних показників, які впливають на попит, можна виділити [2]: рухомість населення; систему розселення населення; рівень розвитку транспортної інфраструктури та рівень автомобілізації.

Слід розуміти, що найбільшого розвитку отримали методи формування МПК на прикладі міських територій, тому аналітичний огляд методів слід зосередити саме на прикладі таких об'єктів і розглянути можливість їх ефективної інтеграції для приміського сполучення.

У дисертаційній роботі [4] запропоновано підхід до визначення потреб у перевезеннях ГТ, що базується на використанні функції розселення міського населення, де встановлено, що просторовий розподіл пасажироутворюючих пунктів та відстаней поїздок має статистично закономірний характер і може бути описаний гама-розподілом. Результати даного дослідження можуть бути взяті за основу при формуванні методологічної основи для подальшого аналізу дальності поїздок у міському та приміському сполученні.

Нормативно-методичні підходи до визначення існуючої та прогнозованої інтенсивності руху викладені у [5]. Документ передбачає використання статистичних методів обробки транспортних потоків, екстраполяції тенденцій та коефіцієнтів росту для прогнозування майбутніх обсягів руху. Запропоновані у [5] методи дозволяють отримувати практичні оцінки інтенсивності руху, однак вони мають обмеження щодо врахування просторової структури попиту та поведінкових чинників мобільності населення.

Економічні аспекти транспортного попиту розглядаються у [6]. У межах цього підходу транспортний попит розглядається як фактор, що впливає на ефективність інфраструктурних інвестицій, економію часу перевезень та зменшення експлуатаційних витрат. Методика забезпечує інструментарій для оцінки доцільності дорожніх проєктів, проте основний акцент зроблено на економічних показниках, а не на закономірностях формування пасажирських потоків.

Фундаментальні засади транспортного моделювання викладені у праці [7], де систематизовано класичні підходи до моделювання транспортного попиту, зокрема чотирьохетапну модель. Значну увагу приділено поведінковим моделям вибору, включаючи логіт-моделі, які дозволяють враховувати індивідуальні переваги користувачів транспортної системи. Запропоновані у [7] методи є базовими для формування сучасних регіональних і міських транспортних моделей.

Поведінкові та соціально-економічні аспекти мобільності населення розглянуті у роботі [8], де досліджується взаємозв'язок між доходами населення, розподілом часу поїздок та мотивацією транспортного вибору. Автори доводять, що транспортний попит формується не лише інфраструктурними можливостями, але й економічними обмеженнями, що визначають прийняття рішень щодо пересування. Отримані в [8] результати підкреслюють необхідність інтеграції економічних і поведінкових факторів у моделі транспортного попиту.

Практична реалізація регіонального транспортного моделювання представлена у звіті [9]. Тут здійснено розробку та валідацію регіональної транспортної моделі з урахуванням землекористування, соціально-економічних параметрів та структури транспортної мережі. Отримані результати демонструють ефективність інтегрованого підходу до прогнозування транспортних потоків та підтверджують важливість узгодження транспортного попиту з просторовим розвитком територій.

У дослідженні [10] розглянуто обмеження мобільності домогосподарств у контексті взаємодії землекористування та транспорту. Автором показано, що вибір місця проживання та транспортні переміщення залежать від часових і фінансових бюджетів населення, що формує довгострокові закономірності попиту на перевезення. Такий підхід дозволяє враховувати не лише поточні транспортні потреби, але й перспективні зміни в структурі розселення.

Сучасні підходи до формування транспортного попиту поєднують просторове моделювання, економічні чинники, поведінкові теорії та статистичні закономірності розподілу дальності поїздок. Водночас залишається актуальним завдання адаптації існуючих моделей до умов приміського сполучення, з урахуванням специфіки розселення населення, транспортної інфраструктури та стохастичного характеру пересувань.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є формалізація методики формування МПК при пересуванні населення ГТ у приміському сполученні з урахуванням встановлених закономірностей розподілу відстаней поїздок.

Викладення основного матеріалу дослідження

У загальному випадку закономірності розподілу фактичних відстаней пересування користувачів ГТ можна розглядати як відображення реалізованого транспортного попиту. Враховуючи те, що в українських містах у приміському сполученні використовується переважно залізничний та автомобільний транспорт, відповідний транспортний попит реалізується на транспортних мережах (ТМ) ГТ цих видів сполучення. При цьому для міст, у яких існує залізничне сполучення, необхідно враховувати частку переміщень, які реалізуються на цьому виді транспорту, але й для найкрупніших, і для малих міст автомобільний транспорт є основним постачальником транспортних послуг у приміському сполученні. Вивчення характеристик ТМ ГТ для автомобільного транспорту у [11] підтвердило, що ТМ ГТ є інструментом, придатним для дослідження просторового розподілу переміщень у приміському сполученні, де було виявлено можливість опису емпіричного розподілу відстаней переміщень показниковим законом розподілу.

Це вказує на можливість визначення найбільш ймовірних станів МПК, посиляючись на криву щільності показникового розподілу, якою описуються закономірності формування пасажиропотоків на території, що оточує місто залежно від віддаленості від нього. У даному випадку найбільш доцільно застосувати ІК моделювання потреб у транспортних послугах. Для розрахунку шуканих матриць потрібно використовувати фактичні закономірності розподілу відстаней поїздок у приміському сполученні.

Наявність параметрів розподілу відстаней поїздок населення дозволить визначити шукані МПК, які приведуть до отримання зазначеного або максимально наближеного фактичного розподілу відстаней пересувань. Відшукування таких станів МПК повинне базуватись на встановленні значень кореспонденцій, що будуть реалізовуватись на визначену відстань з матриці відстаней між транспортними районами (ТР) і в загальній сукупності породять фактичний розподіл відстаней поїздок пасажирів у приміському сполученні.

На основі цього можна встановити порядок заповнення МПК. Фактичний розподіл відстаней поїздок дозволить визначити відсоткове співвідношення кількості мешканців, дальності пересувань яких відносяться до встановлених інтервалів відстаней пересувань у приміському сполученні. Визначати кількість інтервалів, за якими будуть групуватися відстані пересувань, можна безпосередньо за оцінки узгодження емпіричного розподілу цих відстаней з теоретичним показниковим розподілом. Також емпіричний розподіл цих відстаней дає можливість визначення ширини інтервалів.

Згідно з результатами, представленими у [11], був отриманий розподіл відстані пересування пасажирів l'_p , який дозволяє визначити відсоткове співвідношення кількості мешканців, дальності пересувань яких до міста буде відноситись до встановлених інтервалів відстаней пересувань

$$l'_{ij}^{(\Delta_I)} = l_{ij} \in [l_p^{(\Delta_I)}] = l_p^{(\Delta_I)} \in (\Delta_I^H; \Delta_I^E), \quad (1)$$

де l_{ij} – відстань пересувань за межами міста між i -м та j -м ТР, км; $l_p^{(\Delta_I)}$ – відстань поїздок у напрямку міста в інтервалі групування згідно фактичного розподілу відстаней пересувань пасажирів, км; $\Delta_I = (\Delta_I^H; \Delta_I^E)$ – інтервал групування відстаней пересувань пасажирів, $I = 1, 2, \dots, x_{Im}$; x_{Im} – кількість інтервалів групування відстаней пересувань пасажирів.

Частка мешканців, відстань пересувань l'_p яких знаходиться в певному інтервалі, може бути знайдена як різниця значень функції показникового розподілу в точках, що відповідають межах даного інтервалу:

$$P\{l'_{ij}^{(\Delta_I)}\} = P\{l_{ij} \in \Delta_I\} = P\{l_{ij} \in (\Delta_I^H; \Delta_I^E)\} = Z(\Delta_I^E) - Z(\Delta_I^H), \quad (2)$$

де $P\{l'_{ij}^{(\Delta_I)}\} = P\{l_{ij} \in \Delta_I\}$ – ймовірність того, що відстань пересування l_{ij} буде знаходитись в інтервалі Δ_I ; $Z(\Delta_I^E), Z(\Delta_I^H)$ – значення функції розподілу l'_p в точках Δ_I^E та Δ_I^H відповідно.

Відповідно до цього сумарна кількість пересувань $H^{(\Delta_I)}$, які повинні здійснюватися на відстань з певного інтервалу Δ_I може бути визначена як

$$H^{(\Delta_I)} = P\{l'_{ij}^{(\Delta_I)}\} \cdot H, \quad (3)$$

де H – загальна кількість кореспонденцій за період, що розглядається, пас.

Таким чином, для отримання МПК потрібно знайти такий розподіл кореспонденцій, що відповідає системі обмежень

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m h_{ij} = HO_i, & \sum_{j=1}^m h_{ij} = HP_j; \\ \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} h_{ij}^{(\Delta_I)} = H^{(\Delta_I)}, & i \neq j, \quad I = 1, 2, \dots, x_{Im}; \\ \sum_{I=1}^{x_{Im}} H^{(\Delta_I)} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m h_{ij} = H, \end{cases} \quad (4)$$

де h_{ij} – шукані кореспонденції між ТР i та j , пас., $h_{ij} \geq 0$; HO_i, HP_i – місткості ТР з прибуття та відправлення пасажирів, пас.; $h_{ij}^{(\Delta_I)}$ – кореспонденції з числа h_{ij} , які реалізуються на відстані $l_p^{(\Delta_I)}$.

Система обмежень (4) є системою лінійних рівнянь, яка має декілька рішень, тому що кількість рівнянь значно менша за кількість змінних. Це підтверджує доцільність використання ІК для розрахунку потреб населення в пересуваннях. Для отримання МПК, які б задовольняли обмеженням (4), у програмному середовищі MS Excel був розроблений алгоритм, блок-схема якого наведена на рис. 1.

На першому етапі розрахунку здійснюється перевірка збалансованості місткостей ТР з відправлення та прибуття пасажирів $\sum_{i=1}^m HO_i = \sum_{j=1}^m HP_j = H; i, \dots, m; j, \dots, m$ та фактичного розподілу пересувань згідно значенню функції показникового розподілу в межах заданих інтервалів загальній кількості пересувань між ТР $\sum_{I=1}^{x_{Im}} H^{(\Delta_I)} = H$.

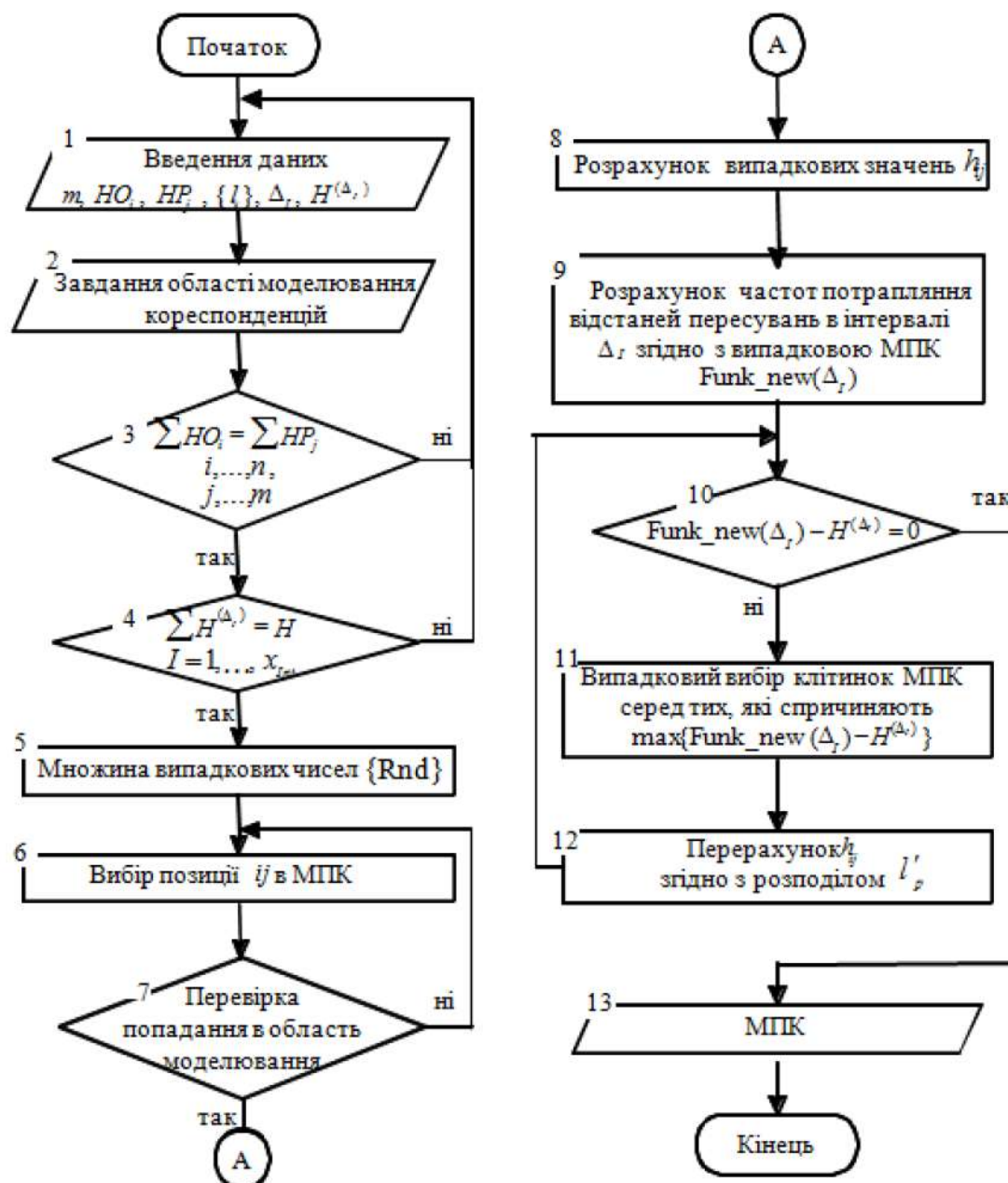


Рис. 1. Блок-схема алгоритму розрахунку МПК згідно з фактичним розподілом відстаней поїздки

На наступному етапі здійснюється заповнення матриці на основі генератора випадкових чисел. Далі здійснюється вибір позиції в матриці та перевірка попадання його в задану область моделювання, яка відповідає значенням згідно (1) та розрахунок випадкового значення h_{ij} в МПК.

Згідно випадковій МПК та матриці найкоротших відстаней розраховується частота потрапляння відстаней пересування $h_{ij}^{(\Delta_i)}$ в межах певного інтервалу Δ_i , а далі здійснюється перевірка відповідності фактичним частотам l'_p . Кінцевим результатом заповненні клітинок МПК є отримання випадкових матриць, що відповідають фактичному розподілу l'_p .

Висновки

Запропонована методика формування моделей транспортного попиту на пересування населення ГТ у при міському сполученні базується на врахуванні фактичних закономірностей у відстанях пересувань. У межах ІК це дозволяє звужити діапазон можливих станів МПК за рахунок використання лише тих матриць, що відповідають фактичним закономірностям розподілу відстані поїздки пасажирів. Звуження меж можливого діапазону станів МПК сприяє отриманню надійної основи для оцінювання результатів реалізації можливих варіантів розвитку прилеглих до міських територій.

Список використаної літератури

1. Кочина А. А. Формування пасажиропотоків у приміському сполученні на автомобільному транспорті : дис. канд. техн. наук : 05.22.01. Харків: ХНАДУ, 2020. 227 с.
2. Кристопчук М. Є., Лобашов О. О. Приміські пасажирські перевезення : монографія. Харків, 2012. 223 с.
3. Пашкевич С. М., Макарічев О. В., Свічинський С. В., Козак С. В. Аналітичний опис розподілу дальності міських пересувань до міжміського автовокзалу. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2023. 4(87). С. 100–109. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.12>
4. Свічинський С. В. Формування функції розселення міського населення для визначення потреб у перевезеннях громадським транспортом: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. Харків : ХНАДУ, 2015. 223 с.
5. Методичні рекомендації з визначення існуючої та прогнозування перспективної інтенсивності руху: МР А.2.1-218-02070915-729. Київ, 2008. 25 с.
6. Методика економічних вишукувань для проектування автомобільних доріг: М 218-05416892-409. Київ, 2004. 34 с.
7. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. *Modelling Transport*. [Third Edition]. Chichester: Wiley. 2006. 499 p.
8. Tilahun N. Y., Levinson D. M., Tilahun N. Y. Selfishness and Altruism in the Distribution of Travel Time and Income. *1th International Association of Travel Behaviour Research Conference in Kyoto, August 2006* : working papers. Minnesota. 2006. P. 1–19.
9. Tampa Bay Regional Planning Model Cube Voyager Conversion: Tech. Rep. No. 1, Validation Rep. Dept. of Transportation, Gannett Fleming. Project ID No. 259173-1-12-05. Florida, 2004. 162 p.
10. Moeckel R. Constraints in household relocation: Modeling land-use/transport interactions that respect time and monetary budgets. *Journal of Transport and Land Use*. 2017. 10(1). P. 211–228. <https://doi.org/10.5198/jtlu.2015.810>
11. Горбачов П. Ф., Макарічев О. В., Кочина А. А. Закономірності розподілу відстаней пересування пасажирів громадського транспорту в приміському сполученні. *Комунальне господарство міст. Серія «Технічні науки та архітектура»*. 2019. 5(151). С. 75–80.

References

1. Kochina, A. A. (2020) Formation of streams of passengers in a suburban report on a motor transport: dys. kand. tekhn. nauk : 05.22.01. Kharkiv : KhNAHU.
2. Krystopchuk, M. Ye., Lobashov, O. O. (2012) Suburban passenger transport : monohraf. Kharkiv.
3. Pashkevych, S. M., Makarichev, O. V., Svichynskiy, S. V., Kozak, S. V. (2023) Analytical Description of the Trip Length Bistribution for Urban Trips to Intercity Bus Station. *Visnyk of Kherson National Technical University*, 4(87), 100–109. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.12>
4. Svichynskiy, S. V. (2015) Formation of urban population settlement functions to determine public transport needs: dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.22.01. Kharkiv : KhNADU.
5. MR A.2.1-218-02070915-729. (2008) Methodological recommendations for determining existing and forecasting future traffic intensity. Kyiv.
6. M 218-05416892-409 (2004.) Methodology of economic research for highway design. Kyiv.
7. Ortuzar, J. D., Willumsen, L. G. (2006) *Modelling Transport*. [Third Edition]. Chichester: Wiley.
8. Tilahun, N. Y., Levinson, D. M., Tilahun, N. Y. (2006) Selfishness and Altruism in the Distribution of Travel Time and Income. *1th International Association of Travel Behaviour Research Conference in Kyoto, August 2006* : working papers. Minnesota, 1–19.
9. Tampa Bay Regional Planning Model Cube Voyager Conversion. (2004) Tech. Rep. No. 1, Validation Rep. Dept. of Transportation, Gannett Fleming. Project ID No. 259173-1-12-05. Florida.
10. Moeckel, R. (2017) Constraints in household relocation: Modeling land-use/transport interactions that respect time and monetary budgets. *Journal of Transport and Land Use*, 10(1), 211–228. <https://doi.org/10.5198/jtlu.2015.810>
11. Horbachov, P. F., Makarichev, O. V., Kochina, A. A. (2019) Law of the distribution of public transport transmitter removal in additional mergers. *Municipal econom of cities*, 5(151), 75–80.

Дата першого надходження статті до видання: 18.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

О. Ф. КУЗЬКІН

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри «Транспортні технології»
Національний університет «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0002-3160-1285

І. М. РАЙДА

старший викладач кафедри «Транспортні технології»
Національний університет «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0003-3925-4692

Л. А. ВЕРЕМЕСНКО

старший викладач кафедри «Транспортні технології»
Національний університет «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0002-2397-310X

ЗАГАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОБУСНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ ВІЙСЬКОВОГО СТАНУ

У статті досліджується проблема інформаційного забезпечення автобусних перевезень в Україні в умовах повномасштабної збройної агресії та воєнного стану. Проаналізовано основні виклики, з якими зіткнулася транспортна галузь з 24 лютого 2022 року, зокрема руйнування дорожньої інфраструктури, брак кваліфікованого персоналу внаслідок мобілізації, нестабільність маршрутів, затримка та скасування рейсів, а також інформаційна невідомість під час міжнародних автобусних перевезень через перевантаженість пунктів пропуску на кордонах.

Окрему увагу приділено проблемі відсутності єдиної цифрової платформи для координації діяльності перевізників і оперативного інформування пасажирів, що нерідко призводить до невідповідності між офіційно оголошеними розкладами руху пасажирського транспорту та їх фактичним дотриманням. Розглянуто роль державних органів влади у адаптації нормативно-правової бази галузі, зокрема спрощення ліцензійних процедур, впровадження державних ІТ-систем та безумовне збереження базових вимог безпеки, таких як контроль режимів праці та відпочинку водіїв.

У роботі також висвітлені питання інформаційного забезпечення пасажирів і транспортних операторів у разі виникнення надзвичайних ситуацій, зокрема оголошення повітряних тривог та загроз кібербезпеці транспортної інфраструктури. На основі проведеного аналізу сформульовано рекомендації для державних органів і транспортних операторів, які спрямовані на підвищення ефективності інформаційного забезпечення учасників процесів пасажирських перевезень, розвиток цифрових рішень і зміцнення довіри пасажирів до діяльності транспортних операторів. Зроблено висновок, що воєнний стан став каталізатором цифровізації транспортної галузі, а набутий при цьому досвід має стати основою для формування стійкої та безпечної системи інформаційного забезпечення автобусних перевезень у післявоєнний період.

Ключові слова: інформаційне забезпечення, автобусні перевезення, воєнний стан, цифровізація транспорту, безпека перевезень.

O. F. KUZKIN

Doctor of Sciences, Professor,
Professor at the Department of Transport Technologies
National University Zaporizhzhia Polytechnic
ORCID: 0000-0002-3160-1285

I. M. RAIDA

Senior Lecturer at the Department of Transport Technologies
National University Zaporizhzhia Polytechnic
ORCID: 0000-0003-3925-4692



L. A. VEREMEIENKO

Senior Lecturer at the Department of Transport Technologies
National University Zaporizhzhia Polytechnic
ORCID: 0000-0002-2397-310X

GENERAL ANALYSIS OF INFORMATION SUPPORT FOR BUS TRANSPORTATION IN WAR CONDITIONS

This article investigates the challenges associated with information support for bus transportation in Ukraine amidst full-scale armed aggression and martial law. It analyzes the primary obstacles faced by the transport industry since February 24, 2022, including the destruction of road infrastructure, a shortage of qualified personnel due to mobilization, route instability, delays and cancellations of services, and information uncertainty during international transportation caused by congested border checkpoints.

This article investigates the challenges associated with information support for bus transportation in Ukraine amidst full-scale armed aggression and martial law. It analyzes the primary obstacles faced by the transport industry since February 24, 2022, including the destruction of road infrastructure, a shortage of qualified personnel due to mobilization, route instability, delays and cancellations of services, and information uncertainty during international transportation caused by congested border checkpoints. Particular attention is given to the absence of a unified digital platform for coordinating carriers and promptly informing passengers, which results in discrepancies between official schedules and actual transport operations. The role of state authorities in adapting the regulatory framework is examined, with a focus on simplifying licensing procedures, implementing state IT systems, and upholding fundamental safety requirements, such as monitoring drivers' work and rest periods.

This paper also addresses communication issues during emergencies, such as air alarms, and threats to the cybersecurity of transport infrastructure. Based on the analysis, recommendations are formulated for state bodies and carriers to enhance the efficiency of information support, develop digital solutions, and strengthen passenger trust. It is concluded that martial law has acted as a catalyst for the digitalization of the transport industry, and the experience gained should serve as the foundation for establishing a sustainable and secure system of information support for bus transportation in the postwar period.

Key words: information support, bus transportation, martial law, digitalization of transport, transportation safety.

Постановка проблеми

Інформаційне забезпечення автобусних перевезень в Україні в умовах повномасштабної збройної агресії набуло критичного значення. Це поняття виходить за рамки звичайного інформування пасажирів про розклад та наявність квитків. Воно охоплює комплексний механізм, який включає зміни в регуляторній політиці, адаптацію до оперативних викликів, впровадження нових технологій та розробку стратегій комунікації в кризових ситуаціях. З 24 лютого 2022 року транспортна система України зіткнулася з безпрецедентними викликами, серед яких руйнування інфраструктури, мобілізація значної частини кваліфікованого персоналу та зміна логістичних ланцюгів.

Незважаючи на ці труднощі, транспортна галузь демонструє значну стійкість та адаптивність. Ця стійкість стала можливою завдяки оперативному перегляду та адаптації чинної законодавчої бази та гнучкості автомобільних перевізників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У зв'язку з повномасштабною війною, інформаційне забезпечення автобусних перевезень в Україні зіштовхнулося з низкою серйозних проблем. Головні з них – це нестабільність та непередбачуваність маршрутів, пов'язана з безпековою ситуацією, а також відсутність єдиної цифрової платформи для координації та інформування пасажирів про актуальні транспортні пропозиції з боку операторів пасажирських автомобільних перевезень.

Нестабільність й непередбачуваність виявляються як в міських, так і в міжміських та міжнародних перевезеннях. Через повітряні тривоги та запровадження комендантських годин автобуси можуть змінювати маршрути або зупинятися, про що пасажирів дізнаються лише безпосередньо від водія або вже після припинення руху. Розклади руху автобусів часто змінюються через безпекову ситуацію на шляхах прямування або на державному кордоні. Інформація про скасування рейсів або їх затримку надходить із запізненням, що може спричинити значні незручності для пасажирів, які планують поїздки.

У жовтні 2022 року, під час масованих ракетних атак на критичну інфраструктуру, багато автовокзалів у Києві та інших великих містах (Дніпрі, Запоріжжі, Харкові) були змушені перенести або скасувати рейси. Інформація про ці зміни поширювалася переважно через соціальні мережі та месенджери, що призводило до плутанини та дезінформації [1].

В Україні існує кілька онлайн-сервісів для купівлі квитків, таких як Busfor, E-ticket та інші. Однак, вони не завжди інтегровані з інформаційними системами перевізників. Це створює ситуації, коли у мережі Internet можна придбати квиток на рейс, який вже скасований або перенесений.

Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України у своїх звітах неодноразово зазначало необхідність створення єдиної цифрової системи для транспорту. Про те саме йдеться й в аналітичних матеріалах «Центру транспортних стратегій» – відсутність єдиного цифрового середовища для всіх перевізників виділяється як основна проблема інформаційного забезпечення перевізного процесу [2].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є аналіз ключових аспектів інформаційного забезпечення, які підтримують функціонування автобусних перевезень в Україні в умовах війни, виявлення проблемних питань та розробка рекомендацій для підвищення ефективності системи транспортного обслуговування пасажирів.

Викладення основного матеріалу дослідження

В умовах організації перевізного процесу в умовах військового стану перед перевізниками й організаторами регулярних перевезень постає ціла низка викликів, представлених на рисунку 1.



Рис. 1. Особливості організації автобусних перевезень в умовах військового стану

Одним з найкритичніших викликів для транспортної галузі стала гостра нестача кваліфікованого персоналу, зокрема водіїв. За аналітичними даними, мобілізація значної кількості водіїв, технічного персоналу та інших фахівців призвела до значного кадрового дефіциту у галузі [3]. Це також підтверджують й статистичні дані (див. рис. 2). Так, у місті Запоріжжя протягом трьох останніх років кількість вакансій для водіїв збільшилася на 203 відсотки [4]. Ця проблема має безпосередній вплив на інформаційне забезпечення пасажирів. Нестача персоналу призводить до нестабільності розкладів руху, зменшення кількості рейсів та їх можливого скасування без попередження, що створює інформаційну невизначеність для пасажирів, які не можуть покладатися на офіційні розклади руху, що, в свою чергу, руйнує довіру пасажирів до системи автобусних перевезень.

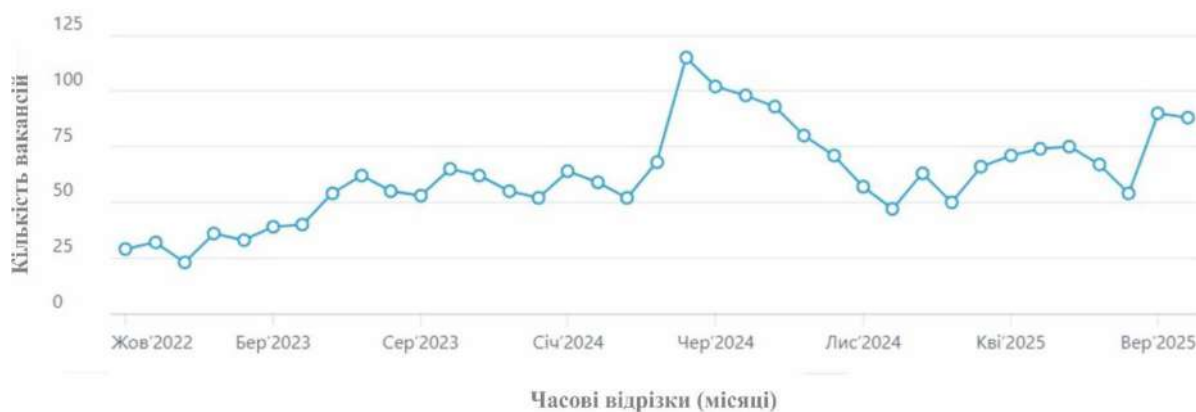


Рис. 2. Зміна кількості вакансій водіїв у місті Запоріжжя [4]

Критичні руйнування дорожньої інфраструктури внаслідок військових дій стають дедалі масштабнішими. Так, на початок 2024 року в Україні було пошкоджено приблизно 25,4 тис. км доріг та 344 мостів і мостових переходів різного значення [5].

Руйнування транспортної інфраструктури, включаючи дороги та мости, а також постійний ризик обстрілів, змушують перевізників шукати альтернативні маршрути [3]. Такий пошук призводить до збільшення часу в дорозі та непередбачуваних затримок. Ситуація ускладнюється постійними оголошеннями повітряних тривог, на які слід реагувати для забезпечення вимог безпеки пасажирів та водіїв.

Проблема регулярних міжнародних автобусних перевезень має свою специфіку. Опитування показали, що черги на кордонах є «найкритичнішою проблемою» для пасажирів, з середнім часом очікування близько 7 годин,

а в окремих випадках – до 20 годин [6]. Невизначеність створює суттєвий інформаційний вакуум. Пасажири та транспортні оператори не мають доступу до актуальної інформації про тривалість очікування, що унеможливило адекватне планування подорожі. Брак інформації є серйозним недоліком у системі інформування пасажирів та водіїв, який безпосередньо впливає на комфорт та надійність міжнародних автобусних перевезень.

Для вирішення зазначених питань необхідне запровадження комплексного підходу до правових та регуляторних аспектів інформаційного обміну учасників процесу пасажирських автобусних перевезень в умовах воєнного стану. Слід зазначити, що певні кроки в цьому напрямку вже робляться.

Так, державні органи адаптували регуляторну базу для забезпечення безперервності пасажирських перевезень. Процедура отримання ліцензії на право провадження господарської діяльності була суттєво спрощена. Заяви на провадження діяльності можна подавати як особисто, так і в електронній формі через спеціалізований портал [7]. Ці зміни вказують на цілеспрямоване спрощення бюрократичних процедур, що дозволило транспортним операторам швидко адаптуватися до мінливих умов та зберегти економічну активність. Однак, на тлі цих спрощень, держава продовжує балансувати між оперативністю та вимогами забезпечення безпеки перевезень. Наприклад, вимоги щодо обладнання транспортних засобів тахографами та дотримання режимів праці водіїв залишилися незмінними, про що свідчать численні судові рішення. Таким чином, дерегуляція в одних аспектах поєднується з жорстким збереженням базових стандартів безпеки в інших.

Питання дотримання норм праці та відпочинку водіїв набуло особливої гостроти в умовах воєнного стану, коли з боку транспортних операторів існує значна спокуса збільшувати тривалість робочого часу водіїв для компенсації кадрового дефіциту. При цьому, згідно з «Положенням про робочий час і час відпочинку водіїв колісних транспортних засобів» [8], автобуси, що виконують регулярні пасажирські перевезення на міжміських маршрутах протяжністю понад 50 км, повинні бути обладнані діючими тахографами. Водії зобов'язані зберігати записи про режими праці та відпочинку протягом 28 днів після закінчення робочої зміни [9]. Рішення Верховного Суду є важливим сигналом для всього ринку пасажирських автобусних перевезень. Вони встановлюють правовий прецедент, який підтверджує, що хаос війни не є виправданням для ігнорування базових норм безпеки. Правова недвозначність виконує функцію стабілізації, інформуючи транспортних операторів про межі дозволеної поведінки та зміцнюючи повноваження регуляторних органів. Таким чином, судова система стає важливим елементом інформаційного забезпечення перевезень, що вимагає дотримання ключових стандартів безпеки.

Важливим кроком у підвищенні прозорості транспортної галузі стало впровадження державних ІТ-систем. Зокрема, Міністерство розвитку громад та територій України спільно з Державною службою з безпеки на транспорті запустили спеціалізований інформаційний портал «Пошук міжнародних маршрутів» [10]. Портал надає відкриті та актуальні дані про міжнародні автобусні маршрути, включаючи розклади руху та інформацію про автомобільних перевізників. Його головна мета серед іншого – надати пасажирам доступ до інформації про надійних, офіційних перевізників і сприяти боротьбі з нелегальними рейсами, кількість яких збільшилась в умовах війни.

Така ініціатива є прямою державною відповіддю на проблему «сірого» ринку перевезень. Створення єдиного реєстру міжнародних маршрутів є джерелом верифікованих даних, що має прямий вплив на безпеку пасажирських перевезень. Такий підхід є частиною ширшої стратегії цифровізації, що дозволяє централізовано управляти інформацією, оперативно реагувати на виклики та формувати основу для майбутнього відновлення транспортної галузі.

Аналогічним чином також було адаптоване законодавство для вирішення проблеми дефіциту пасажирського рухомого складу в містах. Закон України № 4397-IX дозволив комунальним підприємствам з 07.08.2025 року використовувати автобуси, отримані в якості гуманітарної допомоги, для здійснення пасажирських перевезень, включаючи пільгові категорії громадян [11]. Таке рішення є прикладом швидкої адаптації законодавчої бази до нових реалій, що дозволило вирішити проблему дефіциту рухомого складу в містах та регіонах, де рухомий склад громадського транспорту був пошкоджений або знищений внаслідок бойових дій. Зазначена зміна не лише забезпечила безперервність надання транспортних послуг, але й гарантувала, що допомога від міжнародних донорів буде ефективно використана для задоволення потреб населення у пересуваннях.

Особливо гостро в умовах війни постають питання забезпечення безпеки та комунікації під час надзвичайних ситуацій, найрозповсюдженіша з яких – оголошення повітряної тривоги. На рисунку 3 приведена статистика оголошень повітряної тривоги в Запорізькій області за період з вересня 2024 року по вересень 2025 року, яка свідчить про певну тенденцію до збільшення їх частоти та тривалості, а, відповідно, й потенційне загострення означеної вище проблеми.

Одним із прикладів ефективного інформаційного забезпечення в умовах надзвичайних ситуацій є унормування дій учасників процесу пасажирських перевезень під час оголошення повітряної тривоги. Так, у Києві був запроваджений чіткий протокол для громадського транспорту на випадок оголошення тривоги [13]: водії зобов'язані зупинитися біля найближчого укриття та оголосити про можливість для пасажирів перейти в безпечне місце. Такий підхід є прикладом того, як наявність офіційно встановлених і добре донесених правил поведінки водіїв та пасажирів дозволяє перетворити потенційно хаотичну ситуацію на керовану, знижуючи рівень стресу для пасажирів і підвищуючи загальну безпеку перевезень, незважаючи на непередбачувані затримки.

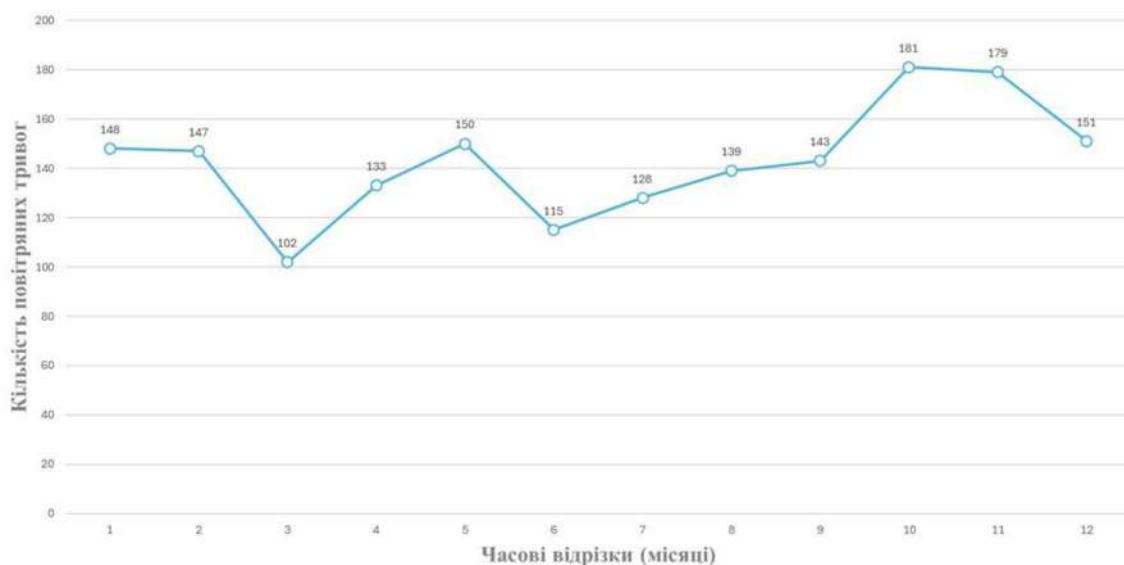


Рис. 3. Статистика оголошень повітряної тривоги в Запорізькій області за період з вересня 2024 року по вересень 2025 року [12]

Транспортна інфраструктура, що є однією з критично важливих систем життєзабезпечення держави, піддається постійним кіберзагрозам [14]. В умовах війни кібератаки, такі як DDoS-атаки або шкідливі програми, набули характеру інструменту гібридної війни, спрямованого на дестабілізацію ситуації в країні. Успішна кібератака може порушити роботу всіх пов'язаних систем – від диспетчерського управління та GPS-відстеження перевезень до сервісів онлайн-продажу квитків [15]. Тому інформаційне забезпечення в цьому контексті є питанням національної безпеки держави. Ефективний захист від таких загроз вимагає належної координації між державними органами та приватним сектором економіки, а також створення загальнонаціональної платформи для обміну інформацією про кіберзагрози [13].

Висновки

Навіть у складних умовах воєнного стану, органи державної влади прифронтових регіонів України та транспортні оператори намагаються підтримувати належний рівень організації та інформаційне забезпечення регулярних пасажирських перевезень. Однак, незважаючи на наявність офіційних розкладів руху на автобусних маршрутах у різних видах сполучення, існує значний розрив між доступною пасажирів інформацією та реальним станом справ. Так, «реальний рух транспорту може не відповідати розкладу» через воєнний стан як такий, брак водіїв та оголошення повітряної тривоги [16]. Зазначене вище ілюструє основну проблему інформаційного забезпечення пасажирських автобусних перевезень в умовах воєнного стану: наявність офіційних даних, які через об'єктивні причини можуть не відбивати мінливу реальність. Це призводить до інформаційної невизначеності у плануванні поїздок пасажирів та змушує останніх покладатися на альтернативні джерела інформації або способи пересування, наприклад, на GPS-сервіси відстеження транспорту або на власні суб'єктивні спостереження, що знижує довіру до системи регулярних пасажирських автобусних перевезень в цілому.

Інформаційне забезпечення автобусних перевезень в Україні в період воєнного стану характеризується постійним балансуванням між дерегуляцією та дотриманням стандартів безпеки перевезень, між централізованою прозорістю державних порталів та децентралізованою ефективністю комерційних мобільних застосунків та онлайн-платформ, а також між офіційною інформацією та непередбачуваною реальністю на місцях.

Враховуючи вищезгадане, можна сформулювати низку рекомендацій з метою підтримки ситуації в керованій площині.

Рекомендації для державних органів влади:

- розробити та впровадити єдину національну платформу для відстеження руху та актуального статусу автобусних рейсів у режимі реального часу, інтегрувавши дані від транспортних операторів та комерційних і державних онлайн-сервісів;
- забезпечити законодавчу та фінансову підтримку для транспортних операторів, які впроваджують інноваційні інформаційні технології для оперативного інформування пасажирів, як-от SMS-розсилання або push-сповіщення;
- розробити та реалізувати державну програму підготовки водіїв автобусів, щоб компенсувати кадровий дефіцит та забезпечити стабільність пасажирських автобусних перевезень.

Рекомендації для перевізників:

- збільшити інвестиції в технологічні рішення для інформаційного забезпечення пасажирів у режимі реального часу, враховуючи специфіку воєнного стану, що дозволить оперативно інформувати фактичних та потенційних пасажирів про затримки, зміну маршрутів або скасування рейсів;
- посилити співпрацю з комерційними онлайн-платформами для розширення аудиторії та підвищення актуальності інформації, що надається пасажирам;
- упорядкувати внутрішні протоколи комунікації між диспетчерською службою, водіями та пасажиром, забезпечуючи швидкий та чіткий обмін інформацією між усіма учасниками процесу перевезень.

Воєнний стан, незважаючи на всі виклики, став каталізатором для цифровізації та підвищення прозорості в транспортній галузі. Досвід, набутий під час війни, зокрема впровадження державних реєстрів, інтеграція з комерційними онлайн-сервісами та розробка протоколів дій у надзвичайних ситуаціях, має бути використаний для післявоєнного відновлення країни. Спираючись на вже створені цифрові платформи та досвід адаптації, Україна може та повинна побудувати більш стійку, ефективну та безпечну систему інформаційного забезпечення пасажирських перевезень, здатну бути готовою до майбутніх викликів та задовольнити зростаючі потреби громадян.

Список використаної літератури

1. Суспільне. «Масований обстріл України: що відомо про роботу транспорту та повітряні тривоги» (10.10.2022) [Електронний ресурс]. URL: <https://susplne.media/287315-masovaniy-obstril-ukraini-so-vidomo-pro-robotu-transportu-ta-povitrani-trivogi/> (дата звернення: 12.05.2025).
2. Центр транспортних стратегій. «Транспортний ринок 2022: підсумки та перспективи» (26.01.2023) [Електронний ресурс]. URL: https://cfts.org.ua/news/2023/01/26/transportnyy_rynok_2022_itogi_i_perspektivy_73142 (дата звернення: 19.05.2025).
3. Lardi Today. «Ключові проблеми у сфері транспорту та логістики під час війни в Україні» (18.06.2024) [Електронний ресурс]. URL: https://logist.today/osoboe_mnenie-uk/2024-06-18/klyuchevye-problemy-v-sfere-transporta-i-logistiki-v-period-voyny-v-ukraine-2/ (дата звернення: 22.05.2025).
4. Портал Work.ua. Статистичні дані вакансій водіїв у Запоріжжі [Електронний ресурс]. URL: <https://www.work.ua/salary-zaporizhzhya-%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%96%D0%B9/?jobsTrendsPeriod=3&salaryTrendsPeriod=3> (дата звернення: 17.10.2025).
5. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на початок 2024 року. 2024. С. 14.
6. Вікно відновлення. «Навіщо реформувати міжнародні автобусні перевезення під час війни» (23.12.2024) [Електронний ресурс]. URL: https://logist.today/osoboe_mnenie-uk/2024-06-18/klyuchevye-problemy-v-sfere-transporta-i-logistiki-v-period-voyny-v-ukraine-2/ (дата звернення: 24.05.2025).
7. Урядовий портал «Шлях» [Електронний ресурс]. URL: <https://shlyah.dsbt.gov.ua/> (дата звернення: 02.06.2025).
8. Міністерство транспорту та зв'язку України. Наказ № 340 від 07.06.2010. Про затвердження Положення про робочий час і час відпочинку водіїв колісних транспортних засобів [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0811-10#Text> (дата звернення: 06.06.2025).
9. HSA. Робочий час та час відпочинку в умовах воєнного стану: висновки Верховного Суду [Електронний ресурс]. URL: <https://www.hsa.org.ua/blog/robocii-cas-ta-cas-vidpocinku-v-umovax-vojnogo-stanu-visnovki-verhovnogo-sudu> (дата звернення: 10.06.2025).
10. Урядовий портал «Пошук міжнародних маршрутів» [Електронний ресурс]. URL: <https://autobus.gov.ua/> (дата звернення: 12.06.2025).
11. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо задоволення потреб населення у перевезеннях в умовах воєнного стану» № 4697-IX [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4397-20#Text> (дата звернення: 18.06.2025).
12. Статистика повітряних тривог по Запорізькій області [Електронний ресурс]. URL: <https://air-alarms.in.ua/region/zaporizhzhia#statistic> (дата звернення: 07.10.2025).
13. Офіційний портал Києва. «Рішення Ради оборони міста Києва: із 21 березня наземний громадський транспорт під час повітряної тривоги, після висадки охочих біля укриття, продовжуватиме рух за маршрутом» (18.03.2025) [Електронний ресурс]. URL: https://kyivcity.gov.ua/news/rishennya_radi_oboroni_mista_kiyeva_iz_21_bereznaya_nazemniy_gromadskiy_transport_pid_chas_povitryano_trivogi_pislya_visadki_okhochikh_bilya_ukrittya_prodozhuvatime_rukh_za_marshrutom/ (дата звернення: 24.06.2025).
14. Величко Л. Ю., Білоконь М. В. Гібридні загрози транспортній інфраструктурі: виклики для державного регулювання та національної безпеки. Теорія та практика державного управління. 2024. Вип. 2 (79). С. 442–464. <http://doi.org/10.26565/1727-6667-2024-2-23>

15. Дорогий Я. Ю. Кібербезпека критичної інфраструктури під час військової загрози / Дорогий Я. Ю., Цуркан В. В. // Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні: матеріали XII міжн. наук.-практ. конф., [Київ], 21-22 листопада 2024 р. – Київ, 2024. – 3 с.

16. Акцент, новини Запоріжжя. «Муніципальний транспорт Запоріжжя: розклад руху автобусів, тролейбусів і трамваїв» (18.04.2025) [Електронний ресурс]. URL: <https://akzent.zp.ua/munitsypalnyj-transport-zaporizhzhya-rozklad-ruhu-avtobusiv-trolejbusiv-i-tramvayiv/> (дата звернення: 15.08.2025).

References

1. (2022) Suspil'ne. "Masovanyy obstril Ukrainy: shcho vidomo pro robotu transportu ta povitryani tryvohy" (10.10.2022) [Social. "Massive shelling of Ukraine: what is known about transport operations and air raids" (10.10.2022)] [in Ukrainian].
2. (2023) Tsentrl transportnykh stratehiy. "Transportnyy rynek 2022: pidsumky ta perspektyvy" (26.01.2023) [Center for Transport Strategies. "Transport Market 2022: Results and Prospects" (26.01.2023)] [in Ukrainian].
3. (2024) Lardi Today. "Klyuchovi problemy u sferi transportu ta lohistyky pid chas viyny v Ukraini" (18.06.2024) ["Key problems in the field of transport and logistics during the war in Ukraine" (18.06.2024)] [in Ukrainian].
4. (2025) Portal Work.ua. Statystychni dani vakansiy vodiiv u Zaporizhzhii [Work.ua portal. Statistical data on driver vacancies in Zaporizhia] [in Ukrainian].
5. (2024) Zvit pro pryami zbytky infrastruktury vid ruynuvan' vnaslidok viys'kovoyi ahresiyi Rosiyi proty Ukrainy stanom na pochatok 2024 roku [Report on direct infrastructure damage from destruction as a result of Russia's military aggression against Ukraine as of early 2024.] [in Ukrainian].
6. (2024) Vikno vidnovlennya. "Navishcho reformuvaty mizhnarodni avtobusni perevezennya pid chas viyny" (23.12.2024) Recovery Window. "Why Reform International Bus Transportation During Wartime" (23.12.2024)] [in Ukrainian].
7. (2025) Uryadovyy portal "Shlyakh" [Government portal «Shlyakh»] [in Ukrainian].
8. (2010) Ministerstvo transportu ta zv'yazku Ukrainy. Nakaz № 340 vid 07.06.2010. Pro zatverdzhennya Polozhennya pro robochyy chas i chas vidpochynku vodiiv kolisnykh transportnykh zasobiv [Ministry of Transport and Communications of Ukraine. Order No. 340 dated 07.06.2010. On approval of the Regulations on working hours and rest periods of drivers of wheeled vehicles] [in Ukrainian].
9. (2025) HSA. Robochyy chas ta chas vidpochynku v umovakh voyennoho stanu: vysnovky Verkhovnoho Sudu [HSA. Working hours and rest periods under martial law: conclusions of the Supreme Court] [in Ukrainian].
10. (2025) Uryadovyy portal "Poshuk mizhnarodnykh marshrutiv" [Government portal "Search for international routes"] [in Ukrainian].
11. (2025) Zakon Ukrainy "Pro vnesennya zmin do deyakykh zakoniv Ukrainy shchodo zadovolennya potreb naselennya u perevezennyakh v umovakh voyennoho stanu" № 4697-IX [Law of Ukraine "On Amendments to Certain Laws of Ukraine Regarding Meeting the Transportation Needs of the Population under Martial Law" No. 4697-IX] [in Ukrainian].
12. (2025) Statystyka povitryanykh tryvoh po Zaporiz'kiy oblasti [Air traffic alert statistics for Zaporizhia region] [in Ukrainian].
13. (2025) Ofitsiynyy portal Kyieva. "Rishennya Rady oborony mista Kyieva: iz 21 berezhna nazemnyy hromads'kyi transport pid chas povitryanoyi tryvohy, pislya vysadky okhochykh bilya ukryttya, prodovzhuvatyme rukh za marshrutom" (18.03.2025) [Official portal of Kyiv. "Decision of the Kyiv City Defense Council: from March 21, ground public transport during an air raid alert, after those who wish to disembark near the shelter, will continue to operate along the route" (18.03.2025)] [in Ukrainian].
14. Velychko L. Y., Bilokon' M. V. (2024) Hibrydni zahrozy transportniy infrastrukturi: vyklyky dlya derzhavnoho rehulyuvannya ta natsional'noyi bezpeky. [Hybrid threats to transport infrastructure: challenges for state regulation and national security]. Teoriya ta praktyka derzhavnoho upravlinnya. [in Ukrainian].
15. Dorohyy Y. Y. (2024) Kiberbezpeka krytychnoyi infrastruktury pid chas viys'kovoyi zahrozy [Cybersecurity of critical infrastructure during a military threat]. Hlobal'ni ta rehional'ni problemy informatyzatsiyi v suspil'stvi i pryrodokorystuvanni: materialy XII mizhn. nauk.-prakt. conf., Kyiv, 21–22 lystopada 2024 r. [in Ukrainian].
16. (2025) Aktsent, novyny Zaporizhzhya. "Munitsypal'nyy transport Zaporizhzhya: rozklad rukhu avtobusiv, troleybusiv i tramvayiv" (18.04.2025) [Accent, Zaporizhia news. "Municipal transport of Zaporizhia: bus, trolleybus and tram timetable" (18.04.2025)] [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 05.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

В. Б. КУЛИК

кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри промислової фармації
Київський національний університет технологій та дизайну,
Інститут фізіології імені О. О. Богомольця
Національної академії наук України
ORCID: 0000-0003-2300-2431

О. М. РОЇК

кандидат фармацевтичних наук, доцент,
доцент кафедри промислової фармації
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-5988-6577

І. В. РЕСНИЦЬКИЙ

кандидат технічних наук,
асистент кафедри промислової фармації,
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0003-4376-0811

Є. В. ЖУРАВЕЛЬ

здобувач вищої освіти
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0009-0006-9888-6744

ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНОСТІ ТА СТАБІЛЬНОСТІ ПРОТЕОЛІТИЧНИХ ЕНЗИМІВ КОСМЕТИЧНОЇ ПУДРИ У ПОРОШКОВІЙ ФОРМІ

У статті досліджено сумарну протеолітичну активність та стабільність протеаз у складі ензимної косметичної пудри у порошковій формі, призначеної для м'якого очищення шкіри. Обґрунтування складу пудри здійснювали з позицій забезпечення контрольованої ексfolіативної дії, мінімізації подразнювального потенціалу та підвищення стабільності ферментів у сухій матриці. Особливу увагу приділено вибору носія та допоміжних компонентів, здатних знижувати швидкість деградації протеаз під впливом вологи й температурних чинників.

Встановлено дозозалежне зростання сумарної протеолітичної активності з 960 до 1810 Од/г при збільшенні концентрації пудри у водній дисперсії від 1,0 до 2,0 %, що свідчить про можливість регулювання інтенсивності очищувальної дії шляхом зміни концентрації продукту під час застосування. Дослідження стабільності показали, що за нормальних умов зберігання протягом 6 місяців зберігалось понад 87 % початкової активності ферментів, що відповідає вимогам до стабільності сухих косметичних форм.

За прискорених умов зберігання (температура 40 °C та відносна вологість 75 %) рівень збереження активності становив 69,1–85,9 % залежно від типу ферменту та складу матриці, при цьому найвищу стабільність демонстрував актинідин. Показано, що композиції на основі рисової пудри характеризуються нижчими втратами протеолітичної активності порівняно з аналогічними зразками на основі каоліну, що свідчить про переваги органічних носіїв у стабілізації ензимів.

Отримані результати підтверджують перспективність ензимних косметичних пудр як ефективних, контрольованих та безпечних засобів очищення шкіри, придатних для використання у сучасних косметичних та косметичних продуктах.

Ключові слова: ензимна косметична пудра, протеолітичні ферменти, папайн, бромелайн, актинідин, протеолітична активність, стабільність, порошкові системи.



V. B. KULYK

PhD in Biology, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technology and Design,
O. O. Bogomoletz Institute of Physiology
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0003-2300-2431

O. M. ROIK

PhD in Pharmacy, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technology and Design
ORCID: 0000-0002-5988-6577

I. V. RESNYTSKYI

Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor at the Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technology and Design
ORCID: 0000-0003-4376-0811

Ye. V. ZHURAVEL

Applicant for Higher Education
Kyiv National University of Technology and Design
ORCID: 0009-0006-9888-6744

RESEARCH OF ACTIVITY AND STABILITY OF PROTEOLYTIC ENZYMES IN POWDERED COSMETIC POWDER

The article investigates the total proteolytic activity and stability of proteases incorporated into an enzymatic cosmetic powder in dry form. The powder composition was substantiated from the standpoint of providing controlled cleansing and exfoliating effects while ensuring enzyme stabilization within a dry matrix. Particular attention was paid to the selection of carrier materials and auxiliary components capable of reducing enzymatic degradation under the influence of moisture and elevated temperature.

A dose-dependent increase in total proteolytic activity from 960 to 1810 U/g was observed when the concentration of the powder in aqueous dispersion increased from 1.0 to 2.0 %, indicating the possibility of regulating the intensity of the cleansing effect by varying the product concentration during application. Stability studies demonstrated that under normal storage conditions for 6 months, more than 87 % of the initial enzymatic activity was retained, meeting the stability requirements for dry cosmetic formulations.

Under accelerated storage conditions (40 °C and 75 % relative humidity), enzyme activity retention ranged from 69.1 % to 85.9 %, depending on the enzyme type and matrix composition, with actinidin exhibiting the highest stability. It was shown that formulations based on rice powder exhibited lower activity losses compared to kaolin-based compositions, indicating the advantages of organic carriers in enzyme stabilization.

The obtained results confirm the potential of enzymatic cosmetic powders as effective, controlled, and safe skin cleansing products suitable for modern cosmetic and cosmeceutical applications.

Key words: enzymatic cosmetic powder, proteolytic enzymes, papain, bromelain, actinidin, proteolytic activity, stability, powder systems.

Постановка проблеми

Зростання попиту на делікатні, але ефективні засоби очищення шкіри актуалізує пошук альтернатив механічним ексфоліантам та кислотним пілінгам, що можуть підвищувати ризик подразнення й порушення бар'єрних властивостей рогового шару [1, 2, 3]. Перспективним напрямом є застосування протеолітичних ензимів рослинного походження, здатних забезпечувати м'яке відлущення поверхневих шарів епідермісу за рахунок контрольованого гідролізу білкових структур [4].

Окремий інтерес становлять ензимні косметичні пудри, де активні компоненти знаходяться у сухій матриці й активуються при контакті з водою безпосередньо під час застосування. Такий формат відповідає сучасним тенденціям «waterless» косметики, сприяє підвищенню стабільності активів і зменшенню потреби в консервантах [3, 5, 6].

Водночас критичними параметрами якості ензимної пудри є рівень сумарної протеолітичної активності та збереження активності ензимів у процесі зберігання, зокрема за несприятливих температурних режимів.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є дослідження сумарної протеолітичної активності ензимної косметичної пудри у водних дисперсіях різної концентрації та оцінка стабільності папаїну, бромелайну й актинідину у порошкових композиціях на різних носіях за нормальних і прискорених умов зберігання.

Викладення основного матеріалу дослідження

Об'єктом дослідження була ензимна косметична пудра, з наступним рецептурним складом: рисовий крохмаль – 30,0 %, вівсяний крохмаль – 15,0 %, мальтодекстрин – 10,0 %, трегалоза – 5,0 %, мікрокристалічна целюлоза – 8,0 %, колоїдна силіка – 4,0 %, папаїн – 1,2 %, бромелайн – 0,8 %, актинідин (стандартизований екстракт ківі) – 0,5 %, ніацинамід – 3,0 %, пантенол – 2,0 %, сухий екстракт зеленого чаю – 2,0 %, цитратна буферна система – 1,5 %, ароматизатор і допоміжні речовини – до 100,0 %. Склад сформовано так, щоб забезпечити: сорбційно-матуючі властивості порошку, сприятливе мікрооточення для білкових молекул, зниження ризику агрегації та формування рН водної суспензії близько 5,8, що є релевантним для шкіри та технологічно доцільним для активності обраних протеаз.

Ензимна система представлена ферментами, підібраними у співвідношенні, орієнтованому на м'який щоденний пілінг (1–3 хв) та більш виражений ефект при застосуванні як маски (до 10 хв) без надмірного ушкодження рогового шару.

Дослідження проводили на лабораторних зразках готової ензимної косметичної пудри. Для оцінки впливу типу носія на стабільність активності окремих протеаз використовували порошкові композиції, у яких ензими адсорбували на каоліні та рисовій пудрі, після чого зразки фасували у герметичні світлонепроникні контейнери. Сумарну протеолітичну активність визначали за гідролізом казеїну (казеїновий метод) з реєстрацією оптичної густини при 280 нм. Активність оцінювали у водних дисперсіях пудри концентрацією 1,0; 1,5; 2,0 %, щоб встановити дозозалежність активності готового продукту. Активність папаїну, бромелайну та актинідину визначали азоказеїновим методом із реєстрацією продуктів гідролізу при 405 нм, із застосуванням однакових умов аналізу для коректного порівняння між ферментами [2, 4]. Стабільність оцінювали протягом 1, 3 і 6 місяців зберігання готової пудри: нормальні умови (20–25 °C та відносна вологість 60 %); прискорені умови (40 °C, 75 % відповідно).

У кожній точці виконували 3 повторності (n=3), результати наведені як середнє $\pm$ похибка.

Результати казеїнового методу наведено в табл. 1. встановлено чітку дозозалежність: зі збільшенням концентрації пудри у водній суспензії від 1,0 до 2,0 % сумарна активність ензимів зростає майже вдвічі – з 960 до 1810 Од/г. Це свідчить про пропорційне вивільнення ферментів із порошкової матриці в умовах, що моделюють реальне застосування косметичного засобу, та відсутність інгібуючого впливу допоміжних компонентів рецептури [9].

Контрольний зразок без ферментів демонструє низьку активність 80 ± 4 Од/г, що пояснюється фоновими ефектами матриці та можливим неферментативним гідролізом у умовах аналізу. Водночас активність дослідних зразків у 20–23 рази перевищує контроль, що однозначно підтверджує визначальний внесок ензимного комплексу.

Таблиця 1

Сумарна протеолітична активність ензимної пудри (казеїновий метод)

Зразок	Концентрація пудри, %	Активність (Од/г)
Пудра (дослідна)	1,0	960 ± 10 (n = 3)**
Пудра (дослідна)	1,5	1370 ± 15 (n = 3)**
Пудра (дослідна)	2,0	1810 ± 18 (n = 3)**
Контроль	2,0	80 ± 4 (n = 3)**

Динаміка збереження активності ферментів за нормальних умов утримання порошкових композицій наведена у табл. 2. Через 6 місяців усі ензими демонструють високу стабільність, збереження активності перевищує 87 % у всіх випадках.

Таблиця 2

Збереження ензиматичної активності протеаз у порошкових композиціях за нормальних умов зберігання.

Ензим	Носій	1 міс %	3 міс %	6 міс %
Папаїн	Каолін	$97.6 \pm 1.3^*$ (n = 3)	$93.8 \pm 1.6^*$ (n = 3)	$89.9 \pm 1.9^*$ (n = 3)
Папаїн	Рисова пудра	$98.4 \pm 1.1^*$ (n = 3)	$95.2 \pm 1.4^*$ (n = 3)	$91.8 \pm 1.6^*$ (n = 3)
Бромелайн	Каолін	$96.8 \pm 1.5^*$ (n = 3)	$92.1 \pm 1.8^*$ (n = 3)	$87.6 \pm 2.1^*$ (n = 3)
Бромелайн	Рисова пудра	$97.9 \pm 1.2^*$ (n = 3)	$94.0 \pm 1.5^*$ (n = 3)	$90.3 \pm 1.7^*$ (n = 3)
Актинідин	Каолін	$98.1 \pm 1.0^*$ (n = 3)	$95.6 \pm 1.3^*$ (n = 3)	$92.7 \pm 1.5^*$ (n = 3)
Актинідин	Рисова пудра	$98.9 \pm 0.9^*$ (n = 3)	$96.8 \pm 1.1^*$ (n = 3)	$94.5 \pm 1.3^*$ (n = 3)

Аналіз результатів дослідження вказує на те, що рисова пудра забезпечує більш сприятливий стабілізуючий ефект ензимів порівняно з каоліном, а найвищу стабільність демонструє актинідин у композиціях з рисовою пудрою [4,7].

За прискорених умов (табл.3.) спостерігається суттєвіше зниження активності досліджуваних ферментів, що пов'язано з прискоренням процесів часткової денатурації білкових молекул та зростанням гігроскопічності порошкових систем [4,7,9].

Таблиця 3

Зміна ензиматичної активності папаїну, бромелайну та актинідину за прискорених умов зберігання ензимної пудри

Ензим	Носій	1 міс %	3 міс %	6 міс %
Папаїн	Каолін	91.8 ± 1.9* (n = 3)	83.4 ± 2.3* (n = 3)	71.6 ± 2.8* (n = 3)
Папаїн	Рисова пудра	93.9 ± 1.6* (n = 3)	86.5 ± 2.0* (n = 3)	77.9 ± 2.4* (n = 3)
Бромелайн	Каолін	90.6 ± 2.1* (n = 3)	81.2 ± 2.6* (n = 3)	69.1 ± 3.0* (n = 3)
Бромелайн	Рисова пудра	92.7 ± 1.8* (n = 3)	84.7 ± 2.2* (n = 3)	75.4 ± 2.6* (n = 3)
Актинідин	Каолін	94.3 ± 1.5* (n = 3)	88.9 ± 1.9* (n = 3)	81.6 ± 2.2* (n = 3)
Актинідин	Рисова пудра	95.8 ± 1.3* (n = 3)	91.7 ± 1.7* (n = 3)	85.9 ± 2.0* (n = 3)

Отже, навіть за екстремальних умов актинідин зберігає понад 80 % активності, що вказує на його високу придатність для стабільних порошкових ензимних продуктів із «запасом» в несприятливих умовах зберігання.

Таблиця 4

Порівняльна оцінка втрати активності ферментів ензимної пудри після 6 місяців зберігання залежно від типу носія

Ензим	Носій	Нормальні умови %	Прискорені умови %
Папаїн	Каолін	10.1* (n = 3)	28.4* (n = 3)
Папаїн	Рисова пудра	8.2* (n = 3)	22.1* (n = 3)
Бромелайн	Каолін	12.4* (n = 3)	30.9* (n = 3)
Бромелайн	Рисова пудра	9.7* (n = 3)	24.6* (n = 3)
Актинідин	Каолін	7.3* (n = 3)	18.4* (n = 3)
Актинідин	Рисова пудра	5.5* (n = 3)	14.1* (n = 3)

Таким чином дані результати досліджень свідчать, що папаїн, бромелайн та актинідин у порошкових композиціях зберігають високий рівень ензиматичної активності протягом щонайменше 6 місяців за нормальних умов зберігання. Найбільш стабільним ферментом у всіх режимах виявився актинідин, особливо у поєднанні з рисовою пудрою як носієм. Сукупність експериментальних даних підтверджує доцільність застосування сухих порошкових форм для створення ензимних косметичних пудр з прогнозованим і достатньо тривалим терміном придатності.

Висновки

1. Експериментально підтверджено високу сумарну протеолітичну активність ензимної косметичної пудри та її дозозалежне зростання: при збільшенні концентрації пудри у водній дисперсії від 1,0 до 2,0 % активність зростає з 960 ± 10 до 1810 ± 18 Од/г, а активність дослідної пудри у 20–23 рази перевищує контроль.

2. За нормальних умов зберігання протягом 6 місяців папаїн, бромелайн та актинідин у порошкових композиціях зберігають високий рівень активності: мінімальне збереження становить 87,6 %, максимальне – 94,5 % (актинідин у рисовій пудрі).

3. За прискорених умов (40 °C, 75 %) зниження активності є інтенсивнішим; однак актинідин зберігає $\geq 81,6$ % активності (каолін) та $\geq 85,9$ % (рисова пудра) через 6 місяців, що підтверджує його найвищу стабільність у складі пудри.

Список використаної літератури

1. Baki, G., & Alexander, K. (2020). *Cosmetic Formulation: Principles and Practice*. Wiley.
2. Papakonstantinou, E., et al. (2021). Synergistic exfoliation systems. *Dermatology Reports*.
3. Kawai, M., et al. (2021). Clinical evaluation of protease-based exfoliants. *Journal of Cosmetic Dermatology*.
4. Nakamura, Y. (2020). Innovations in enzyme stabilization for cosmeceuticals. *Cosmetics*.
5. Gruber, J. V. (2020). Enzymatic modulation of epidermal turnover. *Journal of Cosmetic Science*.
6. Li, J., et al. (2021). Microencapsulation of enzymes for improved stability in cosmetic applications. *International Journal of Cosmetic Science*.

7. Wong, P., & Cheung, L. (2021). Stabilization strategies for proteolytic enzymes in dry formulations. *Journal of Cosmetic Science*.
8. Knackstedt, R., et al. (2022). Probiotics and enzymatic regulation in skin health. *Dermatology and Therapy*.
9. Trevisol, T. C., et al. (2022). In vitro effect on the proteolytic activity of papain with respect to cosmetic formulations. *International Journal of Cosmetic Science*.
10. Venetikidou, M., et al. (2025). Proteolytic enzyme activities of bromelain, ficin and papain from fruit by-products. *Applied Sciences*.

References

1. Baki, G., & Alexander, K. (2020). *Cosmetic formulation: Principles and practice*. Wiley.
2. Papakonstantinou, E., et al. (2021). Synergistic exfoliation systems. *Dermatology Reports*, 13(1).
3. Kawai, M., et al. (2021). Clinical evaluation of protease-based exfoliants. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 20(4), 1234–1242.
4. Nakamura, Y. (2020). Innovations in enzyme stabilization for cosmeceuticals. *Cosmetics*, 7(3), 1–12.
5. Gruber, J. V. (2020). Enzymatic modulation of epidermal turnover. *Journal of Cosmetic Science*, 71(5), 295–304.
6. Li, J., et al. (2021). Microencapsulation of enzymes for improved stability in cosmetic applications. *International Journal of Cosmetic Science*, 43(2), 185–194.
7. Wong, P., & Cheung, L. (2021). Stabilization strategies for proteolytic enzymes in dry formulations. *Journal of Cosmetic Science*, 72(3), 161–170.
8. Knackstedt, R., et al. (2022). Probiotics and enzymatic regulation in skin health. *Dermatology and Therapy*, 12(1), 1–15.
9. Trevisol, T. C., et al. (2022). In vitro effect on the proteolytic activity of papain with respect to cosmetic formulations. *International Journal of Cosmetic Science*, 44(4), 403–412.
10. Venetikidou, M., et al. (2025). Proteolytic enzyme activities of bromelain, ficin and papain from fruit by-products. *Applied Sciences*, 15(2), 1–14.

Дата першого надходження статті до видання: 13.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

В. В. КУРАК

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-4303-5671

О. В. АНДРОНОВА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-9597-8068

А. В. ЛЮБЕЗНИЙ

студент
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0001-4355-5298

РІВНЯННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ РІЧНОГО ОБСЯГУ ВИРОБЛЕНОЇ ЕНЕРГІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМ МАСИВОМ

В даній роботі запропоновано аналітичний вираз у вигляді поліному другого степеню для розрахунку річного обсягу виробленої енергії фотоелектричним масивом в залежності від кута нахилу модулів та їх встановленої потужності. Отриманий вираз базується на середньобаторічних показниках щодо інтенсивності сонячної радіації з кліматичної бази даних NASA і може застосовуватись для оцінки енергетичних параметрів фотоелектричних систем при їх експлуатації в умовах Херсонської області.

Встановлено, що залежність річного обсягу виробленої енергії від кута нахилу орієнтованих на південь фотоелектричних модулів в масиві має вигляд кривої з максимумом при куті нахилу модулів близько 30° , у зв'язку з чим пошук рівнянь, що здатні описати цю залежність, проводився у вигляді поліномів другого, третього та четвертого степенів. Порівняння результатів розрахунку за поліномами з очікуваним обсягом річного вироблення енергії фотоелектричним масивом при кутах нахилу модулів в діапазоні від 0 до 90° показало, що поліноміальна функція другого степеню дозволяє описати хід залежності з точністю, не гіршою 99% , в усьому діапазоні досліджених кутів, в той час як застосування поліномів третього та четвертого степенів призводить до виникнення похибки понад 1% при кутах нахилу модулів, більших за 50° .

Практичне застосування отриманого аналітичного виразу у вигляді поліному другого степеню надає можливість суттєво спростити та прискорити процедуру визначення очікуваного обсягу виробленої енергії фотоелектричним масивом в кліматичних умовах Херсонської області, задаючись лише кутом нахилу орієнтованих на південь модулів та номінальною встановленою потужністю масиву.

Ключові слова: електрична енергія, сонячна радіація, фотоелектричний модуль, кут нахилу модуля, номінальна потужність модуля, електрична генерація, поліноміальна функція.

V. V. KURAK

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy,
Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-4303-5671

O. V. ANDRONOVA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy,
Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-9597-8068



A. V. LIUBEZNYI

Student

Kherson National Technical University

ORCID: 0009-0001-4355-5298

EXPRESSION FOR ESTIMATING THE ANNUAL VOLUME OF ENERGY PRODUCED BY A PHOTOELECTRIC ARRAY

This paper proposes an analytical expression in the form of a second-degree polynomial for calculating the annual volume of energy produced by a photovoltaic array depending on the modules tilt and their installed capacity. The resulted expression is based on NASA long-term average solar radiation intensity database and can be used to estimate the energy parameters of photovoltaic systems when their operating in the climatic conditions of the Kherson region.

It was found that the dependence of the annual energy production on inclination angle of south-oriented photovoltaic array has the form of a curve with a maximum at the module's inclination angle of about 30°, that is why the search for equations capable to describe this dependence was carried out in the form of polynomials of the second, third and fourth degrees. Comparison of the calculation results by the polynomials with the expected photovoltaic array annual generation at module tilt in the range from 0 to 90° showed that the second-degree polynomial function allows describing the dependence with an accuracy of no worse than 99 % in the entire range of angles studied, while the use of third- and fourth-degree polynomials leads to an unconformity of more than 1 % at module tilts greater than 50°.

The practical application of the obtained analytical expression in the form of a second-degree polynomial makes it possible to significantly simplify and speed up the procedure for determining the expected annual volume of energy produced by a photovoltaic array in the climatic conditions of the Kherson region, having at the disposal only the inclination angle of the south-oriented modules and the nominal power of installed array.

Key words: electrical energy, solar radiation, photovoltaic module, module tilt angle, module nominal power, electricity generation, polynomial function.

Постановка проблеми

Збільшення потужностей об'єктів сонячної електричної генерації є одним з пріоритетних завдань на шляху реалізації Енергетичної стратегії України до 2050 року [1], що враховує виклики військового часу, посилення ролі енергетичної безпеки та зміцнення стійкості енергосистеми.

Питання доцільності впровадження об'єктів фотоелектричної генерації в тому чи іншому регіоні України ґрунтується на попередній оцінці та аналізі енергетичних та економічних показників проєкту, що потребує розрахунку обсягу генерованої електричної енергії в розрізі типового року. В основі цього розрахунку лежать дані щодо сонячного енергетичного потенціалу місцевості, технічні параметри компонентів фотоелектричної системи, а реалізація самого алгоритму, як правило, передбачає застосування спеціалізованого програмного забезпечення задля уникнення рутинних процедур, пов'язаних, в першу чергу, з визначенням надходження сонячної радіації до певним чином орієнтованих у просторі фотоелектричних модулів.

Оскільки розподіл річного надходження сонячної радіації на територію України є зоновим [2], то в якості альтернативи пропонується інший підхід до оцінки річного обсягу виробленої енергії, що базується на використанні аналітичних виразів, отриманих для конкретної зони, в межах якої середньорічний обсяг сонячної енергії, що надходить на горизонтальну поверхню, може вважатись фіксованим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [3] представлено методику розрахунку надходження сумарної сонячної радіації до довільно орієнтованої у просторі поверхні приймача з азимутом θ_n та кутом нахилу β відносно горизонту. У відповідності до цієї методики надходження сумарної радіації до поверхні приймача визначається формулою:

$$H_T = H_b \cdot R_b + H_d \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + (H_b + H_d) \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (1)$$

де H_d і H_b – розсіяна і пряма сонячна радіація, що надходять на горизонтальну поверхню; ρ – альbedo підстилаючої поверхні; R_b – поправочний коефіцієнт для прямої радіації.

Коефіцієнт R_b , що фігурує в формулі (1), враховує поправку щодо надходження прямої сонячної радіації на довільно орієнтовану у просторі поверхню приймача відносно потоку радіації на горизонтальній поверхні. Цей коефіцієнт визначається просторовою орієнтацією приймальної поверхні та залежить від широти місцевості φ , схилення Сонця δ і годинного кута ω :

$$R_b = \left\{ \cos \delta \cdot (\sin \beta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta_n \cdot \cos \omega + \sin \beta \cdot \sin \theta_n \cdot \sin \omega) - \sin \beta \cdot \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \theta_n + \right. \\ \left. + \cos \beta \cdot \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \cos \beta \cdot \sin \delta \cdot \sin \varphi \right\} / \left\{ \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta \right\}. \quad (2)$$

У відповідності до [4] при надходженні сумарної сонячної радіації H_T до масиву фотоелектричних модулів встановленою потужністю $P_{ном}^{СБ}$ кількість виробленої ними енергії за даний період часу становитиме:

$$W = k \cdot H_T \cdot P_{\text{ном}}^{CB} / 1000. \quad (3)$$

Коефіцієнт k у формулі (3) враховує втрату потужності за рахунок нагрівання модулів та збільшення відбивання при косому падінні сонячних променів, і дорівнює відповідно 0,7 для зимових та 0,5 для літніх місяців.

Розрахунок обсягу вироблення енергії масивом фотоелектричних модулів за описаною методикою базується на попередньому визначенні середньомісячного денного надходження сумарної сонячної радіації до одиниці площі приймальної поверхні модуля, що потребує залучення рутинної процедури визначення погодинних значень коефіцієнтів R_b протягом характерного дня місяця, а також даних щодо годинного надходження прямої H_b та дифузної H_d складових сонячної радіації на горизонтальну поверхню для заданої місцевості. У зв'язку з цим, значно спростили оцінку обсягу виробленої енергії масивом фотоелектричних модулів в практичних ситуаціях дозволило б використання готових аналітичних виразів, що пов'язують обсяг виробленої енергії зі встановленою потужністю геліополя для умов тієї чи іншої зони сонячної радіації.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є отримання аналітичного виразу, що пов'язує очікуваний річний обсяг виробленої електричної енергії зі встановленою потужністю масиву фотоелектричних модулів на прикладі умов сонячної інсоляції, характерних для Херсонської області.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розрахунок денного надходження сонячної радіації до приймальної поверхні орієнтованого в південному напрямку фотоелектричного модуля ($\theta_n = 0$) здійснювався за виразом (1) для середнього розрахункового дня кожного місяця в діапазоні кутів нахилу $\beta = (0 \div 90)^\circ$ з кроком 15° . В якості вхідних використовувались середньобаторічні дані щодо надходження сумарної H та дифузної H_d сонячної радіації на горизонтальну поверхню для кліматичних умов Херсонської області [5]. Дані щодо прямої складової сонячної радіації H_b знаходили як різницю між сумарною радіацією та дифузною її складовою.

За кількістю сонячної енергії $H_{T \text{ денне}}$, яка надходить протягом характерного розрахункового дня місяця до одиниці площі приймальної поверхні з кутом нахилу β , за формулою (3) розраховували середнє денне вироблення електричної енергії модулем $W_{\text{денне}}$ за умови, що номінальна його потужність $P_{\text{ном}}^{CB} = 1$ Вт. Вироблення електричної енергії за місяць $W_{\text{міс}}$ таким фотоелектричним масивом з одиничною встановленою потужністю визначали множенням середнього денного вироблення $W_{\text{денне}}$ на кількість днів у відповідному місяці, а річне вироблення $W_{\text{рік}}$ знаходили як суму місячних обсягів генерованої енергії.

На рис. 1 представлено результати розрахунку річного розподілу обсягу електричної енергії, виробленої фотоелектричним масивом одиничної встановленої потужності, при фіксованих кутах нахилу модулів в діапазоні від 0 до 90° . Як показує аналіз рис. 1, збільшення кута нахилу призводить до підвищення рівномірності розподілу за місяцями генерованої модулями енергії. Втім, при кутах нахилу понад 45° обсяг виробленої модулями енергії в літні місяці стає доволі низьким, головним чином, за рахунок зменшення потоку сонячної радіації, що надходить до приймальних поверхонь в умовах значних кутів висоти Сонця. Цей результат є очікуваним і корелює з даними, представленими в літературних джерелах, зокрема, в [3, 4].

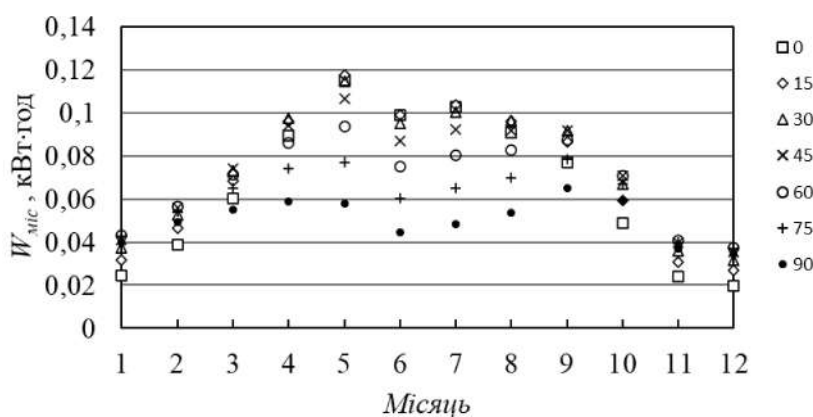


Рис. 1. Розподіл обсягів виробленої енергії фотоелектричним масивом одиничної встановленої потужності протягом року при різних кутах нахилу модулів

Залежність річного обсягу виробленої енергії від кута нахилу фотоелектричних модулів в масиві одиничної встановленої потужності показана на рис. 2.

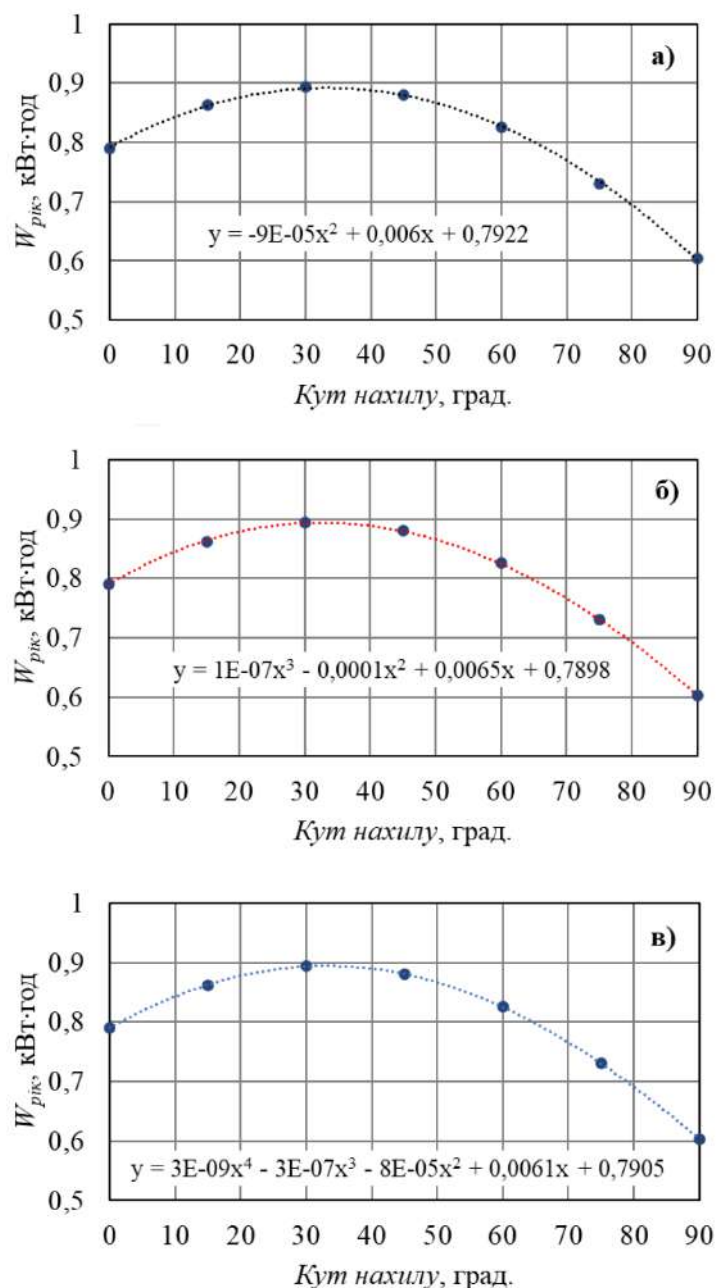


Рис. 2. Апроксимація залежності річного обсягу виробленої енергії від кута нахилу модулів поліномами другого (а), третього (б) та четвертого (в) степенів

Залежність $W_{рік}$ від кута нахилу має вигляд кривої з максимумом при куті β близько 30° . Зважаючи на характер цієї залежності, отримання аналітичного виразу, що її описує, варто проводити у вигляді поліноміальної функції, починаючи з другого степеню і вище. Рівняння функцій, що описують дану залежність у вигляді поліномів другого, третього та четвертого степенів, були отримані з використанням засобів MS Excel і представлені на відповідних графіках рис. 2. Поліноми більш високих порядків не розглядались у зв'язку з недоцільністю їх практичного використання.

В табл. 1 представлено порівняння очікуваних річних обсягів виробленої енергії $W_{рік}$ з результатами розрахунків за відповідними поліномами, а також відносні відхилення отриманих результатів ϵ при фіксованих кутах нахилу модулів в фотоелектричному масиві одиничної потужності.

Відносні відхилення результатів розрахунку за відповідними поліномами від очікуваного річного обсягу генерованої електричної енергії у вигляді залежності від кута нахилу модулів наведено на рис. 3.

Як показує аналіз даних табл. 1 та рис. 3, найменші за абсолютною величиною відносні відхилення в усьому дослідженому діапазоні кутів нахилу модулів забезпечує поліном другого степеню, демонструючи похибку

Таблиця 1

Порівняння річних обсягів виробленої енергії з результатами розрахунку за поліномами

β, град.	$W_{рік}$, кВт · год	Поліном 2-го степеню		Поліном 3-го степеню		Поліном 4-го степеню	
		Розрахунок, кВт · год	ε, %	Розрахунок, кВт · год	ε, %	Розрахунок, кВт · год	ε, %
0	0,7903	0,7922	0,2192	0,7898	-0,0844	0,7905	0,0042
15	0,8628	0,8620	-0,0998	0,8651	0,2696	0,8631	0,0381
30	0,8940	0,8912	-0,3201	0,8975	0,3845	0,8958	0,1978
45	0,8804	0,8799	-0,0512	0,8889	0,9668	0,8880	0,8591
60	0,8255	0,8282	0,3256	0,8414	1,9246	0,8426	2,0676
75	0,7301	0,7360	0,7977	0,7570	3,6790	0,7664	4,9626
90	0,6037	0,6032	-0,0846	0,6377	5,6301	0,6696	10,9190

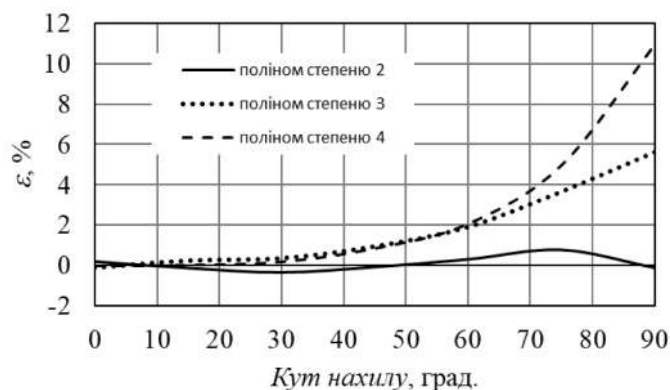


Рис. 3. Відносні відхилення результатів розрахунку за поліномами в залежності від кута нахилу модулів

менше 1 %, в той час як застосування поліномів третього та четвертого степенів призводить до суттєвого зростання похибки при кутах нахилу модулів понад 50°. У зв'язку з цим, для апроксимації залежності річного обсягу виробленої енергії від кута нахилу модулів в фотоелектричному масиві одиначної потужності при його роботі в кліматичних умовах Херсонської області рекомендується застосовувати поліном другого степеню наступного вигляду:

$$W_{рік} = -910^{-5}\beta^2 + 610^{-3}\beta + 0,7922, \text{ кВт} \cdot \text{год.} \quad (4)$$

Враховуючи, що обсяг виробленої енергії фотоелектричним масивом пропорційний його номінальній встановленій потужності $P_{ном}^{СБ}$, формулу (4) можна записати наступним чином:

$$W_{рік} = (-910^{-5}\beta^2 + 610^{-3}\beta + 0,7922)P_{ном}^{СБ}, \text{ кВт} \cdot \text{год.} \quad (5)$$

де кут нахилу модулів β має підставлятися в градусах, а потужність фотоелектричного масиву $P_{ном}^{СБ}$ — у ватах.

Вираз (5) є справедливим для фотоелектричних масивів, приймальна поверхня яких спрямована точно на південь або відхилена від південного напрямку на незначний азимутальний кут, що не перевищує $\pm 30^\circ$ [4]. Більші азимутальні відхилення можуть призводити до зростання похибки проведених за формулою (5) енергетичних оцінок на величину понад 1 %.

Висновки

Отримано аналітичний вираз у вигляді поліному другого степеню, який надає можливість суттєво спростити та прискорити процедуру визначення очікуваного обсягу виробленої енергії фотоелектричним масивом в кліматичних умовах Херсонської області, задаючись лише кутом нахилу орієнтованих на південь модулів та номінальною встановленою потужністю масиву.

Список використаної літератури

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року» [Електронний ресурс]. Верховна рада України [Сайт]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text> (дата звернення 14.01.26). Назва з екрану.
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. За заг. ред. С. О. Кудрі. К. : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. 82 с.
3. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2013. 910 p.

4. Курак В. В., Андропова О. В., Погребняк І. Ф. Оцінка вироблення енергії фасадними фотоелектричними системами в кліматичних умовах м. Херсон. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. № 4(91). 2024. С. 85–90. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.10>

5. POWER. Data Access Viewer [Electronic resource]. Access mode: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (last access: 14.10.2025). Title from the screen.

References

1. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated April 21, 2023 No.373-p “On approval of the Energy Strategy of Ukraine for the period until 2050” [Electronic resource]. Verkhovna Rada of Ukraine [Site]. Access mode: <https://enerhodzherela.com.ua/analitika/> (last access: 14.01.26). Title from the screen.

2. Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovlyuvanykh dzherel enerhiyi Ukrayiny [Atlas of the energy potential of renewable energy sources of Ukraine]. K.: Instytut vidnovlyuvanoyi enerhetyky NANU, 2020. 82 p. [in Ukrainian].

3. Duffie J. A., Beckman W. A. (2013) Solar Engineering of Thermal Processes. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 910 p.

4. Kurak V. V., Andronova O. V., Pogrebniak I. F. (2024) Otsinka vyroblennya enerhiyi fasadnymy fotoelektrychnymy systemamy v klimatychnykh umovakh m. Kherson [Evaluation of the facade photoelectric systems energy production in the climate conditions of Kherson]. *Visnyk of Kherson National Technical University*, no. 4(91), pp. 85–90. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.10>

5. POWER. Data Access Viewer [Electronic resource]. Access mode: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (last access: 14.10.2025). Title from the screen.

Дата першого надходження статті до видання: 16.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

Д. А. КУЧИНСЬКА

PhD

Київський національний університет технологій та дизайну

ORCID: 0009-0007-5928-6639

Р. М. МОСКАЛЬ

аспірант кафедри хімічної технології та ресурсозбереження

Київський національний університет технологій та дизайну

ORCID: 0009-0006-1004-5917

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ЕКСТРУДОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ НА ОСНОВІ КРОХМАЛЮ З ДОДАВАННЯМ ЛИМОННОЇ КИСЛОТИ

Метою даної роботи було встановлення закономірностей формування структури та комплексне дослідження фізико-хімічних характеристик біодеградуєбельних екструдованих матеріалів на основі суміші крохмалю та полівінілового спирту (ПВС). Основний науковий інтерес полягав у вивченні впливу введення лимонної кислоти безпосередньо у полімерну композицію на сумісність компонентів та експлуатаційні властивості отриманих композитів. Робота спрямована на визначення ролі лимонної кислоти як реагенту, що забезпечує хімічне зшивання фаз у процесі термомеханічного впливу.

Експериментальна частина дослідження передбачала розробку та оптимізацію складів полімерних систем на основі нативного крохмалю та ПВС. Для забезпечення необхідної термопластичності розплаву до складу вводили гліцерин як пластифікатор. Модифікацію структури матеріалу здійснювали шляхом додавання до композиції лимонної кислоти у концентраціях 1 % та 2 % за масою. Для ідентифікації структурних трансформацій та верифікації міжмолекулярних взаємодій застосовували метод інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є (FTIR) у режимі порушеного повного внутрішнього відбиття (ППВВ).

Результати досліджень спектрального аналізу підтвердили перебіг процесів хімічної взаємодії в системі, що відобразилося у появі характерних смуг поглинання в області $1730\text{--}1750\text{ см}^{-1}$, що відповідають валентним коливанням естерних груп. Встановлено, що присутність лимонної кислоти сприяє інтенсивнішому міжланцюговому зшиванню, що призводить до зростання механічної міцності та суттєвого зниження гідрофільності матеріалу. Оцінка сорбційної здатності екструдатів продемонструвала, що зразки з вмістом лимонної кислоти мають значно вищу вологостійкість порівняно з базовими композиціями без кислоти, що є критичним показником для їх практичного впровадження.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні прямої кореляції між кількістю введеної лимонної кислоти в процесі екструзії та динамікою формування естерних зв'язків, що визначають кінцеві фізико-хімічні властивості композита. Вперше детально описано характер зміни інтенсивності смуг поглинання гідроксильних та карбонільних груп у системі крохмаль/ПВС залежно від вмісту доданої кислоти в умовах високотемпературного зсуву. Практична значимість результатів полягає у розробці ефективної одностадійної технології виробництва біорозкладних матеріалів, що дозволяє отримувати конкурентоспроможну екологічну продукцію (від пакування до аграрних компонентів) на основі відновлюваної сировини.

Ключові слова: модифікований крохмаль, полівініловий спирт, лимонна кислота, екструзія, полімерні композиції.

D. A. KUCHYNSKA

PhD

Kyiv National University of Technologies and Design

ORCID: 0009-0007-5928-6639

R. M. MOSKAL

Postgraduate Student at the Department of Chemical Technologies
and Resource Saving

Kyiv National University of Technologies and Design

ORCID: 0009-0006-1004-5917



SPECIFIC FEATURES OF THE TECHNOLOGY FOR OBTAINING EXTRUDED POLYMER COMPOSITIONS BASED ON STARCH ADDITION WITH CITRIC ACID

The aim of this study was to establish the patterns of structure formation and to conduct a comprehensive investigation into the physicochemical characteristics of biodegradable extruded materials based on a blend of starch and polyvinyl alcohol (PVA). The primary scientific interest focused on evaluating the effect of adding citric acid directly into the polymer composition on component compatibility and the performance properties of the resulting composites.

The experimental phase involved the development and optimization of polymer systems based on native starch and PVA. To ensure the necessary thermoplasticity of the melt, glycerol was introduced as a plasticizer. Structural modification was achieved by incorporating 1 % and 2 % (by weight) of citric acid into the polymer composition. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) in Attenuated Total Reflectance (ATR) mode was employed to identify structural transformations and verify intermolecular interactions.

Spectral analysis confirmed the occurrence of chemical interactions within the system, evidenced by the appearance of characteristic absorption bands in the 1730–1750 cm^{-1} region, corresponding to the stretching vibrations of ester groups. It was found that the presence of citric acid promotes more intensive interchain cross-linking, leading to increased mechanical strength and a significant reduction in the material's hydrophilicity. Evaluation of the sorption capacity showed that samples containing citric acid possess considerably higher moisture resistance compared to basic formulations without acid, which is a critical parameter for their practical implementation.

The scientific novelty of this work lies in establishing a direct correlation between the amount of citric acid added during the extrusion process and the dynamics of ester bond formation, which determine the final physicochemical properties of the composite. For the first time, the nature of changes in the intensity of hydroxyl and carbonyl group absorption bands in the starch/PVA system was described in detail as a function of the acid content under high-temperature shear conditions.

The practical significance of the results lies in the development of an efficient one-step technology for the production of biodegradable materials, enabling the creation of competitive eco-friendly products (from packaging to agricultural components) based on renewable raw materials.

Key words: *modified starch, polyvinyl alcohol, citric acid, extrusion, polymer compositions, FTIR spectroscopy, biodegradable materials.*

Постановка проблеми

Створення екологічно безпечних та функціонально стабільних полімерних матеріалів є одним із пріоритетних завдань сучасного матеріалознавства, що зумовлено необхідністю заміни синтетичних пластиків біодеградуєними аналогами [1]. У цьому контексті розробка композиційних систем на основі природних полісахаридів та синтетичних водорозчинних полімерів відкриває широкі можливості для створення пакувальних матеріалів, сорбентів та систем контрольованого вивільнення активних речовин. Проте використання нативних біополімерів часто обмежене їхньою низькою термопластичністю та чутливістю до вологи, що потребує пошуку ефективних методів хімічної та технологічної модифікації [2].

Сучасні стратегії отримання таких матеріалів базуються на застосуванні методу екструзії, який дозволяє досягти високого ступеня гомогенізації компонентів під дією зсувних напружень та температур безпосередньо в процесі переробки. Одним із найбільш перспективних підходів є створення екструдованих композицій на основі суміші полівінілового спирту (ПВС) та нативного крохмалю з безпосереднім введенням лимонної кислоти як реакційноздатного агента у полімерну композицію. Такий спосіб реалізації хімічної взаємодії *in situ* забезпечує формування додаткових естерних зв'язків між макромолекулами компонентів, що позитивно впливає на механічну міцність, структурну стабільність та гідрофобність кінцевого продукту [3].

Центральною науковою проблемою в даному напрямі є необхідність встановлення чіткої кореляції між кількісним вмістом доданої лимонної кислоти, характером хімічної взаємодії компонентів у розплаві та фізико-хімічними властивостями отриманих екструдатів. Ключовим інструментом для вирішення цього завдання є метод інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є (FTIR-спектроскопія), який дає змогу ідентифікувати структурні зміни, що відбуваються *in situ* під час термічної переробки, підтвердити проходження реакцій естерифікації між крохмалем, ПВС та лимонною кислотою, а також оцінити характер сформованих міжмолекулярних взаємодій у багатокомпонентній системі [4].

Попередні результати досліджень свідчать, що екструдовані композиції на основі суміші крохмалю та ПВС із додаванням лимонної кислоти демонструють покращені експлуатаційні характеристики порівняно з аналогічними системами без кислотного реагенту, що підтверджується даними спектрального аналізу. Це відкриває значні перспективи для їх впровадження у виробництво біорозкладної тари та технічних виробів з регульованим терміном служби. Однак для повного розуміння потенціалу таких систем необхідна подальша оптимізація параметрів екструзійного процесу, зокрема температурно-швидкісних режимів, та детальне вивчення стабільності сформованих хімічних зв'язків у структурі композита протягом тривалого терміну зберігання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розробка функціональних композиційних матеріалів на основі модифікованого крохмалю та полівінілового спирту (ПВС) методом екструзії є перспективним напрямом у створенні екологічно безпечних полімерних систем. Враховуючи глобальну тенденцію до переходу на біодеградубельні матеріали, дослідження полісахаридів як відновлюваної сировини для промислового використання набуває особливої актуальності. Крохмаль, як один із найбільш доступних та економічно вигідних біополімерів, характеризується високою біосумісністю та здатністю до повного розкладання в природних умовах, що робить його привабливим компонентом для виробництва пакувальних матеріалів та сорбційних систем [5]. Проте нативний крохмаль має суттєві обмеження, зумовлені високою гідрофільністю та низькою термопластичністю, що ускладнює його переробку традиційними методами високотемпературної екструзії та обмежує механічну стабільність готових виробів [6].

Для усунення зазначених недоліків та розширення функціональних можливостей крохмалевмісних систем ефективним підходом є хімічна модифікація органічними кислотами, зокрема лимонною кислотою. Такий процес дозволяє здійснювати естерифікацію гідроксильних груп крохмалю, що веде до часткової деструкції та підвищення термопластичних властивостей. Модифікація лимонною кислотою не лише покращує сумісність крохмалю з ПВС, а й сприяє формуванню просторово-зшитих структур, які підвищують гідрофобність та механічну міцність екструдованих композицій, забезпечуючи їхню стабільність у процесі експлуатації.

Ключовим методом аналізу отриманих полімерних матриць є інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є (FTIR-спектроскопія), яка дозволяє на молекулярному рівні ідентифікувати результати хімічної взаємодії між компонентами. Застосування FTIR-аналізу дає змогу зафіксувати появу характерних смуг поглинання естерних зв'язків та зміни в інтенсивності коливань гідроксильних груп, що є прямим підтвердженням успішної модифікації та гомогенізації суміші під час екструзійного процесу [7]. Такі спектральні дані є критично важливими для прогнозування фізико-хімічної поведінки матеріалу та його здатності до взаємодії з оточуючим середовищем.

Важливим аспектом використання екструдованих систем є можливість їхнього функціонального наповнення для специфічних галузей застосування, зокрема для створення сорбційних матеріалів або інтелектуальної упаковки. Процес екструзії забезпечує рівномірний розподіл активних агентів у полімерній матриці та дозволяє контролювати морфологію кінцевого продукту шляхом регулювання температурних режимів та швидкості зсуву. Матричні властивості композиції МК/ПВС створюють умови для формування стабільних міжмолекулярних комплексів, що забезпечує довговічність матеріалу та збереження його експлуатаційних характеристик у широкому діапазоні умов [8].

Встановлено, що поєднання природного та синтетичного полімерів дозволяє досягти синергетичного ефекту, де ПВС виступає пластифікатором та структуроутворювачем, а модифікований крохмаль забезпечує біодеградубельність та зниження собівартості. Дослідження показують, що такі композиції мають потенціал у боротьбі з пластиком забрудненням, оскільки продукти їх деградації не є токсичними для навколишнього середовища [9]. Крім того, наявність карбонільних груп, введених за допомогою лимонної кислоти, створює додаткові центри для подальшої функціоналізації матеріалів, що розширює їхнє застосування від агросектору до технічних фільтраційних систем [10].

Перспективним напрямом є оптимізація рецептур екструдованих сумішей для досягнення балансу між швидкістю біорозкладання та механічною витривалістю. Використання сучасних аналітичних методів, зокрема FTIR-спектроскопії у поєднанні з термічним аналізом, дозволяє детально вивчити механізми старіння таких полімерів [11]. Це дає можливість створювати матеріали з програмованим терміном служби, що є вкрай важливим для сталого розвитку галузі полімерних композицій.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є дослідження структурних особливостей та фізико-хімічних властивостей екструдованих полімерних композицій на основі крохмалю, з додаванням лимонної кислоти та полівінілового спирту, а також верифікація міжмолекулярних взаємодій у системі методом FTIR-спектроскопії для обґрунтування їх загального промислового використання.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для верифікації проходження процесів хімічної модифікації крохмалю лимонною кислотою та детального аналізу структурних трансформацій у розроблених екструдованих матеріалах було застосовано метод інфрачервоної спектроскопії з Фур'є-перетворенням (FTIR). Експериментальні дослідження проводилися з використанням ІЧ-спектрометра PerkinElmer Spectrum за методикою порушеного повного внутрішнього відбиття (ППВВ, ATR), що дозволило проаналізувати твердотільні зразки екструдатів без руйнування їхньої морфологічної цілісності. Застосування кристала ZnSe забезпечило ефективну взаємодію інфрачервоного випромінювання з поверхневим шаром композита через еванесцентну хвилю, дозволяючи ідентифікувати валентні та деформаційні коливання функціональних груп у діапазоні $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ з роздільною здатністю 4 см^{-1} .

Підготовка полімерної композиції

Полімерну композицію готували на основі крохмалю та полівінілового спирту (ПВС), який виконує функцію гідрофільного термопластичного модифікатора та плівкоутворювача. Як реакційноздатний пластифікатор

і зшивальний агент використовували лимонну кислоту (ЛК) у концентраціях 1 та 2 мас. % від загальної маси сухих компонентів.

На першому етапі крохмаль попередньо висушували до вологості не більше 8–10 % для забезпечення стабільної переробки в екструдері. ПВС розчиняли у воді при температурі 85–90 °С до отримання однорідної гумоподібної маси з масовою часткою полімеру 45 %.

Екструзію здійснювали на двох шнековому лабораторному екструдері при параметрах процесу: температура зон екструдера: зона подачі 90–95 °С; зона пластифікації 110–120 °С; зона дозування та головка 140–145 °С, швидкість обертання шнека 40–50 об/хв.

Основним об'єктом порівняльного аналізу виступили суміші крохмалю, лимонної кислоти та полівінілового спирту (ПВС) у співвідношенні 50/50, де варійованою величиною виступала концентрація лимонної кислоти як модифікуючого агента (1 %, 2 %). Аналіз отриманих FTIR-спектрів дозволив встановити характер молекулярних взаємодій між компонентами системи та виявити специфічні зміни в хімічній структурі, зумовлені термо-механічним впливом під час екструзії. Ключовим індикатором успішної модифікації стало виявлення нових смуг поглинання в області 1730–1750 cm^{-1} , що відповідає валентним коливанням карбонільних груп ($\text{C}=\text{O}$) в естерних зв'язках. Формування даних зв'язків між карбоксильними групами лимонної кислоти та гідроксильними групами ПВС і крохмалю свідчить про проходження реакцій естерифікації та «зшивання» полімерних ланцюгів, що безпосередньо корелює з концентрацією модифікатора.

Результати досліджень

Дослідження динаміки спектральних змін у діапазоні 3200–3600 cm^{-1} продемонструвало значні трансформації в системі водневих зв'язків. Розмиття та зміщення інтенсивності смуг поглинання гідроксильних груп ($-\text{OH}$) свідчать про формування розгалуженої мережі міжмолекулярних взаємодій між крохмалем та ПВС. Важливо зазначити, що зразки, з 2 % лимонної кислоти, характеризувалися більш вираженими змінами в області 1000–1700 cm^{-1} , де зосереджені коливання зв'язків $\text{C}-\text{O}$ та $\text{C}-\text{C}$, що вказує на вищий ступінь гомогенізації фаз та зміну конформаційного стану полімерних ланцюгів у матриці. Зокрема, у зразках з вищою концентрацією кислоти спостерігалося зменшення інтенсивності піків вільної води, що підтверджує ефективніше заміщення гідрофільних центрів крохмалю під час модифікації.

Порівняльний аналіз отриманих спектрів виявив подібність загальних профілів поглинання, проте варіація інтенсивності характеристичних максимумів дозволяє стверджувати про можливість прецизійного регулювання властивостей екстродованих композицій (рис. 1). Встановлена залежність між концентрацією лимонної кислоти та інтенсивністю естерних піків підтверджує, що обрані умови модифікації забезпечують створення стабільної полімерної матриці. Отримані дані FTIR-спектроскопії слугують фундаментом для подальшого прогнозування механічної витривалості та швидкості біодеградації розроблених матеріалів, обґрунтовуючи їхню конкурентоспроможність у порівнянні з традиційними полімерними композиціями.

Таким чином, розроблена технологія отримання екстродованих композицій на основі суміші крохмалю та полівінілового спирту з додаванням лимонної кислоти забезпечує формування стабільної полімерної матриці

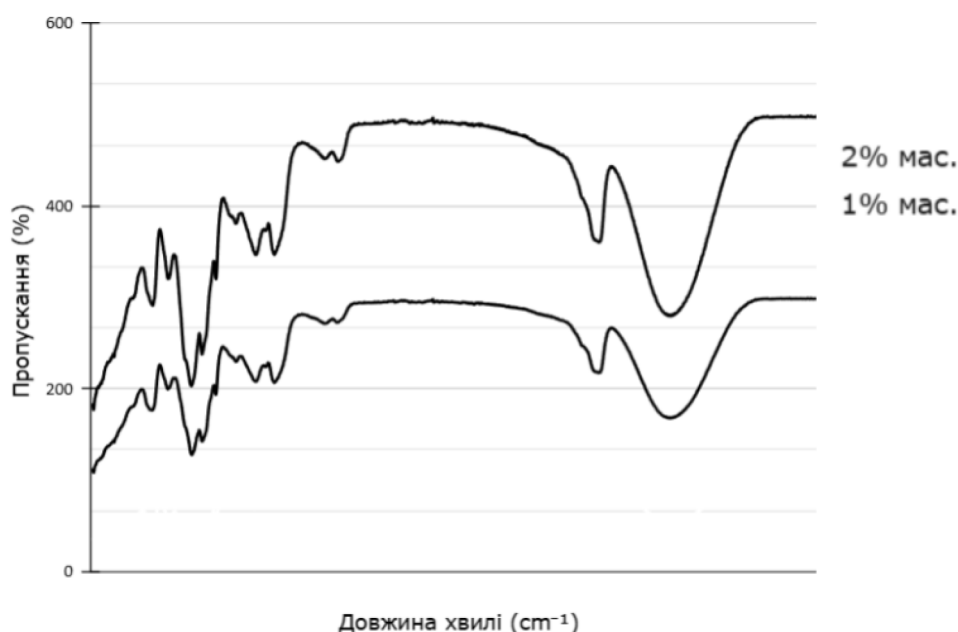


Рис. 1. FTIR – спектри полімерних композицій на основі крохмалю з додаванням лимонної кислоти

з прогнозованими фізико-хімічними властивостями. Результати FTIR-спектроскопії підтвердили, що процес екструзії в поєднанні з введенням лимонної кислоти безпосередньо у композицію сприяє утворенню нових естерних зв'язків та розгалуженій мережі міжмолекулярних взаємодій, що дозволяє повною мірою реалізувати потенціал біополімерної сировини.

Використання методу термомеханічної переробки для систем крохмаль/ПВС/лимонна кислота відкриває широкі перспективи для альтернативного застосування крохмалевмісних матеріалів у промисловості, роблячи їхнє виробництво більш технологічним, одностадійним та ефективним. Отримані дані свідчать про можливість створення надійної сировинної бази для виробництва біodeградебельних виробів, що поєднують у собі експлуатаційну стійкість та високу екологічну безпеку, мінімізуючи антропогенне навантаження на навколишнє середовище.

Висновки

У межах проведеного дослідження було здійснено комплексний аналіз структурних та фізико-хімічних характеристик екструдованих полімерних композицій на основі сумішей крохмалю та полівінілового спирту (ПВС) із прямим введенням лимонної кислоти як функціональної добавки. Основну увагу було приділено вивченню механізмів міжмолекулярної взаємодії та верифікації проходження реакцій хімічного зшивання компонентів безпосередньо в процесі переробки під впливом термомеханічних чинників.

Експериментальні дані, отримані за допомогою методу FTIR-спектроскопії, свідчать про те, що всі досліджені зразки характеризуються наявністю естерних зв'язків, формування яких підтверджується появою специфічних смуг поглинання в області $1730\text{--}1750\text{ см}^{-1}$. Це доводить високу ефективність застосування лимонної кислоти як зшиваючого агента, що сприяє утворенню стабільної тривимірної структури між макромолекулами крохмалю та полівінілового спирту безпосередньо в екструдері. Така структурна організація є ключовим фактором у забезпеченні покращених фізико-механічних властивостей та суттєвому зниженні гідрофільності отриманих композитів.

Екструзія полімерної композиції на основі крохмалю та ПВС із додаванням 2 % лимонної кислоти визначена як ефективний метод одержання біорозкладних матеріалів із керованими реологічними та експлуатаційними властивостями. Оптиміальне співвідношення компонентів та параметрів екструзійного процесу забезпечує стабільність переробки та формування матеріалів, перспективних для використання у пакувальній індустрії, медико-технічній сфері та екологічних проектах.

Окрім структурної цілісності, досліджувані системи продемонстрували високий ступінь гомогенізації фаз, що підтверджується аналізом динаміки смуг поглинання гідроксильних груп у діапазоні $3200\text{--}3600\text{ см}^{-1}$. Встановлено, що варіація концентрації доданої кислоти (1 % та 2 %) дозволяє ефективно регулювати інтенсивність міжмолекулярних взаємодій. Це відкриває можливості для створення матеріалів із заданим рівнем експлуатаційної витривалості та контрольованою швидкістю біodeградації.

Таким чином, отримані результати підтверджують значний технологічний потенціал екструдованих композицій на основі сумішей крохмаль/ПВС/лимонна кислота як перспективної сировини для промислового виробництва екологічно безпечних пакувальних матеріалів та технічних виробів. Застосований методологічний підхід довів свою ефективність у прогнозуванні функціональних характеристик полімерних систем. Подальші дослідження будуть спрямовані на детальне вивчення реологічної поведінки розплавів, оптимізацію режимів екструзії та оцінку біodeградебельності композитів у реальних умовах експлуатації.

Список використаної літератури

1. Reddy N., Yang Y. Citric acid cross-linking of starch films. *Food Chemistry*. 2010. Vol. 118, Iss. 3. P. 702–711. doi:10.1016/j.foodchem.2009.05.050.
2. Mendoza A. J. The effect of citric acid on the properties of starch-based plastics. *Journal of Student Science and Technology*. 2015. Vol. 8, Iss. 3. P. 41–47. doi:10.13034/jsst.v8i3.67.
3. Shi R. et al. Characterization of citric acid/glycerol co-plasticized thermoplastic starch/poly(vinyl alcohol) blends. *Carbohydrate Polymers*. 2008. Vol. 74, Iss. 4. P. 763–770. doi:10.1016/j.carbpol.2008.04.045.
4. Tsou C.-H. et al. Synthesis and characterization of biodegradable starch-based composites. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 101, Iss. 1. 012018. doi:10.1088/1755-1315/101/1/012018.
5. García-Guzmán L. et al. Bio-Based Polymers: A Review on Starch-Based Materials and Their Use in Food Packaging. *Polysaccharides*. 2022. Vol. 3, Iss. 1. P. 136–177. doi:10.3390/polysaccharides3010007.
6. Olsson E. Effects of Citric Acid on Starch-Based Barrier Coatings. *Doctoral dissertation*. Karlstad University Studies, 2013.
7. Andrews B. A. K. Nonformaldehyde Cross-linking of Starch with Polycarboxylic Acids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1996. Vol. 35, Iss. 7. P. 2395–2398. doi:10.1021/ie950470f.
8. Coma V. et al. Edible antimicrobial films based on chitosan and methylcellulose with organic acid additives. *Carbohydrate Polymers*. 2002. Vol. 51, Iss. 1. P. 1–9. doi:10.1016/S0144-8617(02)00191-1
9. Zhou J., Tong J., Su X., Ren L. Hydrophobic starch-based biodegradable films modified by citric acid. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2016. Vol. 91. P. 1186–1193. doi:10.1016/j.ijbiomac.2016.06.082

10. Jiugao Y., Ning W., Xiaofei M. The effects of citric acid on the properties of thermoplastic starch. *Starch/Stärke*. 2005. Vol. 57, Iss. 10. P. 494–504. doi:10.1002/star.200500423
11. Wang N., Yu J., Han C. Preparation and characterization of thermoplastic starch/poly(lactic acid) blends. *Polymers and Polymer Composites*. 2007. Vol. 15, Iss. 7. P. 545–552. doi:10.1177/096739110701500704

References

1. Reddy N., Yang Y. Citric acid cross-linking of starch films. *Food Chemistry*. 2010. Vol. 118, Iss. 3. P. 702–711. doi:10.1016/j.foodchem.2009.05.050
2. Mendoza A. J. The effect of citric acid on the properties of starch-based plastics. *Journal of Student Science and Technology*. 2015. Vol. 8, Iss. 3. P. 41–47. doi:10.13034/jsst.v8i3.67
3. Shi R. et al. Characterization of citric acid/glycerol co-plasticized thermoplastic starch/poly(vinyl alcohol) blends. *Carbohydrate Polymers*. 2008. Vol. 74, Iss. 4. P. 763–770. doi:10.1016/j.carbpol.2008.04.045
4. Tsou C.-H. et al. Synthesis and characterization of biodegradable starch-based composites. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 101, Iss. 1. 012018. doi:10.1088/1755-1315/101/1/012018
5. García-Guzmán L. et al. Bio-Based Polymers: A Review on Starch-Based Materials and Their Use in Food Packaging. *Polysaccharides*. 2022. Vol. 3, Iss. 1. P. 136–177. doi:10.3390/polysaccharides3010007
6. Olsson E. Effects of Citric Acid on Starch-Based Barrier Coatings. Doctoral dissertation. Karlstad University Studies, 2013.
7. Andrews B. A. K. Nonformaldehyde Cross-linking of Starch with Polycarboxylic Acids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1996. Vol. 35, Iss. 7. P. 2395–2398. doi:10.1021/ie950470f
8. Coma V. et al. Edible antimicrobial films based on chitosan and methylcellulose with organic acid additives. *Carbohydrate Polymers*. 2002. Vol. 51, Iss. 1. P. 1–9. doi:10.1016/S0144-8617(02)00191-1
9. Zhou J., Tong J., Su X., Ren L. Hydrophobic starch-based biodegradable films modified by citric acid. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2016. Vol. 91. P. 1186–1193. doi:10.1016/j.ijbiomac.2016.06.082
10. Jiugao Y., Ning W., Xiaofei M. The effects of citric acid on the properties of thermoplastic starch. *Starch/Stärke*. 2005. Vol. 57, Iss. 10. P. 494–504. doi:10.1002/star.200500423
11. Wang N., Yu J., Han C. Preparation and characterization of thermoplastic starch/poly(lactic acid) blends. *Polymers and Polymer Composites*. 2007. Vol. 15, Iss. 7. P. 545–552. doi:10.1177/096739110701500704

Дата першого надходження статті до видання: 09.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

В. М. ЛАЗОРИК

аспірант

Херсонський національний технічний університет

ORCID: 0000-0003-2244-6815

І. А. СЕЛІВЕРСТОВ

кандидат технічних наук, доцент

Херсонський національний технічний університет

ORCID: 0009-0009-6135-816

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ ЗАСТОСУВАННЯМ НАНОСТРУКТУРНИХ КОМПОНЕНТІВ

У статті розглянуто актуальну проблему підвищення зносостійкості плазмово напилених покриттів шляхом модифікування вихідних порошкових матеріалів наноструктурними компонентами. Разом із тим експлуатаційні властивості плазмових покриттів значною мірою залежать від структури сформованого шару, пористості, фазового складу та рівномірності розподілу зміцнювальних компонентів. Одним із перспективних напрямів удосконалення технології є введення нанодисперсних добавок, здатних суттєво впливати на процеси формування мікроструктури покриттів і підвищувати їх механічні та триботехнічні характеристики.

Метою дослідження було визначення впливу нанодисперсного оксиду алюмінію Al_2O_3 на структуру, мікротвердість та зносостійкість плазмових покриттів, сформованих із самофлюючого порошку ПС-12НВК-01 системи Ni-Cr-B-Si-C. Для модифікування використовували нанопорошок Al_2O_3 із розміром частинок 50–70 нм, отриманий кріохімічним методом. Підготовку композиційних порошків здійснювали методом механохімічного легування в планетарному млині. Плазмове наплення виконували в режимі генерації ламінарного плазмового струменя, що забезпечувало зниження окислення частинок під час переносу в плазмі та сприяло стабільному формуванню покриття.

Експериментально встановлено, що введення нанодисперсного Al_2O_3 у кількості 0,1–5 мас.% суттєво впливає на формування структури покриття та його експлуатаційні характеристики. Термічне оплавлення при температурі 1050 °C забезпечує ущільнення шару та підвищення мікротвердості. Найбільш ефективним виявився вміст нанодобавки 0,2 мас.% Al_2O_3 , при якому спостерігається максимальне зростання мікротвердості та зносостійкості. Підвищення концентрації нанопорошку до 1,5–5 мас.% призводить до збільшення пористості, об'єднання пор по межах зерен та створення умов для утворення мікротріщин, що негативно впливає на цілісність покриття. Отримані результати підтверджують доцільність застосування наноструктурних компонентів як ефективного способу підвищення зносостійкості плазмових покриттів.

Ключові слова: плазмове наплення, композитні порошки, наноструктурні компоненти, зносостійкість, механохімічне легування.

V. M. LAZORYK

Postgraduate Student

Kherson National Technical University

ORCID: 0000-0003-2244-6815

I. A. SELIVERSTOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Kherson National Technical University

ORCID: 0009-0009-6135-816

INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF PLASMA COATINGS BY USING NANOSTRUCTURED COMPONENTS

The article addresses the relevant problem of improving the wear resistance of plasma-sprayed coatings by modifying the initial powder materials with nanostructured components. At the same time, the service properties of plasma coatings largely depend on the structure of the formed layer, its porosity, phase composition, and the uniform distribution of reinforcing components. One of the most promising approaches to improving the technology is the introduction



of nanosized additives capable of significantly influencing the formation of the coating microstructure and enhancing its mechanical and tribological characteristics.

The aim of the study was to determine the effect of nanosized aluminum oxide Al_2O_3 on the structure, microhardness, and wear resistance of plasma coatings produced from the powder Ni–Cr–B–Si–C system. For modification, Al_2O_3 nanopowder with a particle size of 50–70 nm obtained by a cryochemical method was used. The preparation of composite powders was carried out by mechanochemical alloying in a planetary mill. Plasma spraying was performed under conditions of laminar plasma jet generation, which reduced oxidation of powder particles during plasma transfer and contributed to stable coating formation.

It was experimentally established that the introduction of nanosized Al_2O_3 in the amount of 0.1–5 wt.% significantly affects the coating formation processes and its performance characteristics. Thermal remelting at a temperature of 1050 °C ensures densification of the layer and an increase in microhardness. The most effective nanoparticle content was found to be 0.2 wt.% Al_2O_3 , at which the maximum increase in microhardness and wear resistance was observed. An increase in the nanopowder concentration to 1.5–5 wt.% leads to higher porosity, pore coalescence along grain boundaries, and the creation of conditions for microcrack formation, which negatively affects the integrity of the coating. The obtained results confirm the feasibility of using nanostructured components as an effective method for improving the wear resistance of plasma coatings.

Key words: plasma spraying, composite powders, nanostructured components, wear resistance, mechanochemical alloying.

Постановка проблеми

Серед сучасних технологій інженерії поверхні плазмове напылення покриттів вирізняється високою продуктивністю, енергетичною ефективністю та універсальністю щодо поєднання матеріалів основи і покриття. Важливою перевагою даного методу є практична відсутність обмежень за температурою плавлення та теплофізичними характеристиками застосовуваних матеріалів. Крім того, сучасні технічні засоби реалізації процесів плазмового напылення дозволяють у широких межах регулювати співвідношення між тепловою та кінетичною енергією частинок, що забезпечує можливість цілеспрямованого формування структури та властивостей покриттів.

Одним із перспективних напрямів підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів і, зокрема, плазмових покриттів є введення наноструктурних компонентів до складу напылюваних порошкових композицій або вдосконалення самого процесу напылення шляхом зміни конструкції плазмотронів та режимів обробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Використання нанодисперсних добавок у порошковій металургії дозволяє зменшити пористість виробів і покращити комплекс механічних властивостей матеріалів [1].

Дисперсно-зміцнені матеріали, що містять нанорозмірні вclusions, характеризуються підвищеною міцністю при статичних і циклічних навантаженнях, а також більшою твердістю порівняно з матеріалами із традиційною крупнозернистою структурою. Зокрема, межа текучості таких матеріалів може зростати у 2,5–3 рази, тоді як пластичність зменшується незначно або навіть підвищується (наприклад, для сплавів Ni_3Al – до 4 разів) [1].

На даний час наноструктуровані матеріали використовуються переважно як високоміцні та зносостійкі. Встановлено, що введення нанодисперсних частинок карбіду кремнію до складу чавунів приводить до підвищення їх зносостійкості, збільшення міцності на 20–30 % і твердості приблизно на 10 %. Для зносостійких чавунів також зафіксовано збільшення відносного подовження на 10–20 %, а енергії руйнування – на 20–80 %. Корозійна стійкість модифікованих чавунів і сталей у кислотних середовищах зростає у декілька разів порівняно з немодифікованими зразками.

Перспективність наномодифікації підтверджується також результатами досліджень поверхонь нержавіючих сталей. Так, модифікування нанодисперсними частинками срібла забезпечує підвищення корозійної стійкості та формування антибактеріальних властивостей, що є важливим для біомедичних застосувань [2]. Композиційні матеріали на основі алюмінієвих сплавів, зміцнені нанодисперсними частинками високомодульних тугоплавких сполук, характеризуються високими антифрикційними властивостями та зносостійкістю [3, 4].

У роботі [5] встановлено зниження залишкових напружень у наноструктурних покриттях WC/12Co та $\text{Al}_2\text{O}_3/13\text{TiO}_2$, що є критично важливим для їх експлуатації в умовах високих механічних і термічних навантажень. Наноструктурні композиційні порошки також застосовувалися для формування покриттів методом HVOF [6], при цьому середній розмір карбідних частинок становив близько 24 нм, що дозволило розглядати наноструктурні карбіди хрому як перспективну альтернативу традиційним покриттям на основі карбідів вольфраму.

Додавання нанорозмірних компонентів до складу композиційних порошків сприяє інтенсифікації процесів плавлення та формування покриттів завдяки зниженню температури плавлення композитів. Так, у роботі [7] для композиції TiC–Ni з нанодобавками ZrO_2 та Al_2O_3 зафіксовано зменшення температури плавлення в середньому на 300–400 °C.

У дослідженні [8] запропоновано багатокомпонентні покриття на основі порошкових систем типу α – β – γ , де α -компонента включає сплави та оксиди (Ni–Al, Ti–Al, Al_2O_3 , ZrO_2), β -компонента містить три і більше елементів

(Mo, Co, Al, Cr, Ti, C, N, Y), а γ -компонента представлена нанорозмірними оксидами діоксиду кремнію (аеросил SiO_2). Введення наночастинок аеросилу розміром 5–20 нм забезпечило суттєве підвищення основних механічних характеристик покриттів.

Автором роботи [9] отримано покриття з оксиду алюмінію шляхом плазмового напилення гранульованих нанопорошків Al_2O_3 при атмосферному тиску. Встановлено, що зі збільшенням потужності плазмотрона зменшується розмір зерен і шорсткість поверхні. Рентгенофазовий аналіз показав зміну фазового складу напиленого шару порівняно з вихідним порошком: вміст $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ збільшувався з 56,52 % до 100 % при підвищенні потужності пальника з 3,2 до 4,52 кВт.

У роботі [10] детально досліджено вплив нанопорошку оксиду титану на мікроструктуру плазмово напиленого покриття. Показано, що додавання TiO_2 приводить до зменшення кількості мікро- і макротріщин, а також пористості порівняно з покриттями з чистого порошку Al_2O_3 . Встановлено раціональний вміст нанопорошку TiO_2 на рівні 1,5 мас. %, що забезпечує підвищення адгезійної міцності на 15–20 %, мікротвердості – на 25–30 % та збільшення корозійної стійкості приблизно у 2,8 рази.

Наноструктурні компоненти здатні підвищувати не лише зносостійкість, але й антифрикційні властивості покриттів. Так, у роботі [11] досліджено мікроструктуру та зносостійкість плазмових покриттів на основі порошку ПГ19М з наночастинками SiO_2 . Показано, що навіть при малому масовому вмісті наночастинок досягається зростання мікротвердості та зносостійкості, а також покращуються антифрикційні характеристики покриття.

Таким чином, модифікування плазмових покриттів нанодисперсними компонентами є ефективним підходом до керування їх фізико-механічними та експлуатаційними властивостями. Важливо, що ультрадисперсні керамічні добавки є відносно доступними та вводяться у склад покриття у малих концентраціях (частки відсотка), забезпечуючи суттєвий технологічний ефект.

Формулювання мети дослідження

Тому метою даної роботи є дослідження за впливу наноструктурних (нанодисперсних) компонентів, введених до складу порошкових матеріалів, на формування структури, фазового складу та експлуатаційних властивостей плазмово напилених покриттів, а також оцінювання ефективності наномодифікації як способу підвищення зносостійкості покриттів.

Викладення основного матеріалу дослідження

В якості основи композиційного порошку використовували порошок ПС-12 НВК-01 – являє собою спеціалізований матеріал, що застосовується для зміцнення та відновлення поверхонь з металу. Він складається з суміші легуючих елементів та металів, таких як вуглець, бор, хром, нікель (Ni-Cr-B-Si-C), що забезпечують велику корозійну стійкість, твердість та зносостійкість, розмір фракції порошку складав 50–80 мкм. До основи ПС-12 НВК-01 додавався нанодисперсний порошок Al_2O_3 з розміром частинок 50–70 нм, отриманого за крихімічною технологією.

Наночастки оксиду алюмінію мають сферичну форму. У вигляді порошків вони досить стабільні, у водних розчинах схильні до агрегації. Нанодисперсний оксид алюмінію має низку властивостей – термостійкість, висока твердість, хімічна інертність.

Для приготування готової композиційної суміші використовувався метод механохімічного легування у планетарному млині [12], технологічний процес легування та особливості були описані в роботі [13].

Напилення порошку здійснювалося плазмовим методом в режимі генерації ламінарного плазмового струменя, що сприяло зменшенню окислення частинок порошку під час польоту. Ламінарна течія плазмового струменя забезпечувалася спеціально розробленою конструкцією електродугового плазмотрона [14].

Підкладки для напилення були виготовлені з низьковуглецевої сталі, режим термообробки – відпуск, температура $(840 \pm 10)^\circ\text{C}$, охолодження на повітрі.

Характеристики покриттів вивчали за допомогою металографічного аналізу. Мікротвердість покриттів визначали за Віккерсом, навантаження 0,548Н. Випробування покриттів на зносостійкість проводилося на спеціально розробленій машині тертя на основі пристрою для оцінки ефективності зміцнюючих і тонкоплівкових технологій «Эхо-1» [15]. В основу метода покладена контактна взаємодія двох тіл при якому, досліджуваний зразок (індентор) впроваджують при його обертальному русі в контртіло, твердість якого нижче твердості індентора. Пара тертя: нерухомий плоский зразок –досліджуваний, рухливий (контртіло) циліндр діаметром 8 мм – твердий сплав. По умовам експериментів значення окружної швидкості контртіла 0,1 м/с, навантаження 10,0 Н.

За результатами досліджень отримані наступні результати:

На рисунках 1,2 і таблиця 1 наведено результати експериментальних досліджень мікротвердості, зносостійкості та мікроструктури плазмових покриттів, сформованих із самофлюсівного порошку ПС-12НВК-01 з введенням нанодисперсного оксиду алюмінію Al_2O_3 у кількості 0,1 до 5 мас. %.

В таблиці 1, вказані середні значення мікротвердості плазмових покриттів до та після оплавлення. Представлені дані демонструють, що термічне оплавлення при температурі 1050°C сприяє ущільненню структури покриття та зростанню його мікротвердості. Найвищі значення мікротвердості зафіксовані для покриттів, модифікованих нанопорошком Al_2O_3 .

Таблиця 1

Значення мікротвердості покриттів, МПа

Об'ємний вміст нанопорошку, %	0	0,2	1	1,5	5
Без оплавлення	304	358	340	336	330
З оплавленням	424	483	458	449	434

На рисунку 1 наведено кінетику зношування досліджуваних покриттів, що підтверджує позитивний вплив нанодобавок на їх триботехнічні характеристики. Отримані результати вказують, що введення 0,2 мас.% Al_2O_3 забезпечує найбільш ефективне підвищення зносостійкості покриття. При цьому, у процесі тертя протягом 2 годин втрата маси зразків без нанодобавок збільшилася у 2 рази, а після оплавлення – у 3,8 рази, що свідчить про суттєво низьку зносостійкість немодифікованих покриттів.

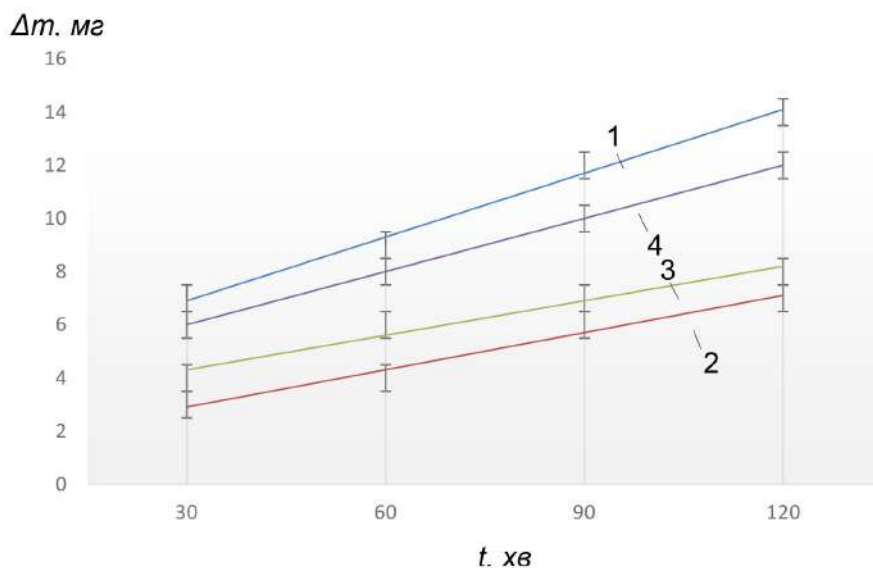


Рис. 1. Кінетика зношування плазмових покриттів з порошку ПС-12НВК-01

1 – ПС-12НВК-01; 2 – ПС-12НВК-01 + 0,2 % Al_2O_3 ; 3 – ПС-12НВК-01 + 1,5 % Al_2O_3 ; 4 – ПС-12НВК-01 + 5 % Al_2O_3 .

Металографічні дослідження, представлені на рисунку 2, ілюструють вплив наночастинок Al_2O_3 на формування структури плазмового покриття. Для складу з концентрацією 1,5 мас.% Al_2O_3 спостерігається зміна морфології структури та зростання пористості. При підвищенні вмісту нанопорошку до 5 мас.% відбувається об'єднання пор по межах зерен, що створює умови для утворення мікротріщин і погіршує цілісність покриття.

Таким чином, встановлено, що введення нанодисперсного оксиду алюмінію до складу порошку ПС-12НВК-01 суттєво впливає на процеси формування покриття, змінює його мікроструктуру та сприяє підвищенню механічних і триботехнічних властивостей. Максимальне збільшення мікротвердості (приблизно на 50 HV) досягнуто при введенні 0,2 мас.% Al_2O_3 , що також забезпечує оптимальне зростання зносостійкості.

Висновки

Встановлено, що введення нанодисперсного оксиду алюмінію Al_2O_3 (50–70 нм) до складу самофлюсівного порошку ПС-12НВК-01 істотно впливає на процес формування плазмового покриття, його мікроструктуру та комплекс експлуатаційних властивостей.

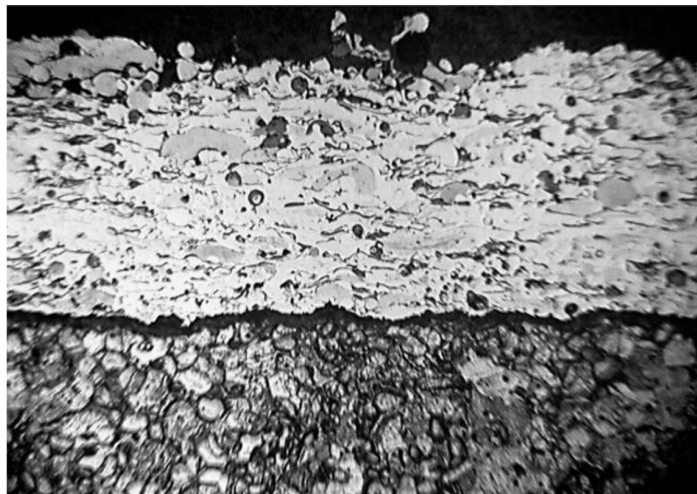
Підтверджено ефективність механохімічного легування в планетарному млині як способу рівномірного введення нанодобавок до порошкової композиції та підготовки матеріалу до плазмового напилення.

Термічне оплавлення покриттів при температурі 1050 °С сприяє ущільненню структури, зменшенню дефектності та підвищенню мікротвердості покриттів порівняно зі станом без оплавлення.

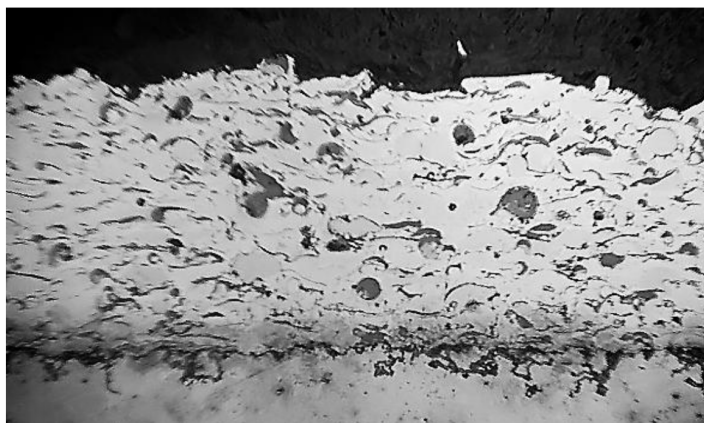
Найкращі показники мікротвердості та зносостійкості отримано при введенні 0,2 мас.% нанодисперсного Al_2O_3 . При цьому зафіксовано максимальне збільшення мікротвердості (приблизно на 50 HV) та суттєве підвищення опору зношуванню.

Збільшення вмісту нанодобавки до 1,5 мас.% і вище супроводжується зміною морфології структури, зростанням пористості та появою умов для утворення мікротріщин, що знижує ефективність зміцнення.

Встановлено, що надлишковий вміст нанопорошку Al_2O_3 (5 мас.%) призводить до об'єднання пор по межах зерен і погіршення цілісності покриття, що негативно впливає на його триботехнічні характеристики.



а



б



в

Рис. 2. Мікроструктура плазмового покриття з порошку ПС-12НВК-01

а – ПС-12НВК-01, б – ПС-12НВК-01 + 1,5 % Al_2O_3 , в – ПС-12НВК-01 + 5 % Al_2O_3

Отримані результати підтверджують перспективність наномодифікації як ефективного способу підвищення зносостійкості плазмових покриттів та обґрунтовують оптимальний вміст нанодисперсного оксиду алюмінію на рівні 0,2 мас.% для покриттів на основі ПС-12НВК-01.

Список використаної літератури

1. Vinogradov A. Yu., Agnew S. R. Nanocrystalline Materials: Fatigue // *Encyclopedia of Nanotechnology*. New York : Marcel Dekker, 2004. P. 2269–2288. <https://doi.org/10.2320/matertrans.42.74>
2. Karabulut G., Beköz Üllen N., Akyüz E., Karakuş S. Surface modification of 316L stainless steel with multifunctional locust gum/polyethylene glycol-silver nanoparticles using different coating methods // *Progress in Organic Coatings*. 2023. Vol. 174. Article 107291. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2022.107291
3. Shtansky D. V. et al. [Title not specified] // *Surface and Coatings Technology*. 2001. Vol. 148, No. 2–3. P. 204–213.
4. Influence of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni-WC composite coatings / Wu P., Dii H. M., Chen X. L., Li Z. Q., Bai H. L., Jiang E. Y. // *Wear*. 2004. Vol. 257, No. 1–2. P. 142–147. DOI: 10.1016/j.wear.2003.10.019
5. Liu X., Zhang B. Effects of grinding process on residual stresses in nanostructured ceramic coatings // *Journal of Materials Science*. 2002. Vol. 37. P. 3229–3239. doi.org/10.1023/A:1016174731658
6. He J., Ice M., Lavernia E. J. Synthesis of nanostructured Cr3C2-25(Ni20Cr) coatings // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2000. Vol. 31A. P. 555–564. DOI:10.1007/s11661-000-0290-0
7. Levashov E. A., Pogozhev Yu. S., Kudryashov A. E., Rupasov S. I., Levina V. V. TiC–Ni-based composite materials dispersion-strengthened by nanoparticles for electrospark deposition // *Journal of Non-Ferrous Metals*. 2008. Vol. 49, No. 5. P. 397–403. DOI:10.3103/S1067821208050167
8. Зенкин Н. А., Копылов В. И. Повышение эксплуатационных характеристик композиционных материалов путем оптимизации упрочняющих технологий. Киев : Головна спеціалізована редакція літератури мовами національних меншин України, 2002. 272 с.
9. Marcinauskas L. Deposition of alumina coatings from nanopowders by plasma spraying // *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2010. Vol. 16, No. 1. P. 47–51. ISSN 1392-1320.
10. Смирнов И. В., Чёрный А. В., Фурман В. К., Долгов Н. А. Влияние нанодисперсных модификаторов на структуру и свойства плазменно напыленных покрытий // *Матеріалознавство та машинобудування*. 2017. № 5. DOI: 10.20535/1810-0546.2017.5.94945
11. Смирнов И. В. и др. Повышение износостойкости плазменных покрытий на основе композиционного порошка с наночастицами SiO₂ // *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. 2011. № 2. С. 70–74. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/b8149814-1a67-4b48-abd9-2f610008b363>
12. Senderowski C., Vigilanska N., Burlachenko O., Grishchenko O., Murashov A., Stepanyuk S. Effect of APS Spraying Parameters on the Microstructure Formation of Fe3Al Intermetallics Coatings Using Mechanochemically Synthesized Nanocrystalline Fe-Al Powders // *Materials*. 2023. Vol. 16(4). Article 1669. DOI:10.3390/ma16041669
13. О. В. Ляшко, В. М. Лазорик, І. А. Селіверстов. Механохімічне легування композитних порошків Al-Si-hBN для нанесення ущільнюючих плазмових покриттів. Том 1 № 3(94) (2025): Вісник Херсонського національного технічного університету, с. 177–182, <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.21>
14. Пристрій для плазмового-дугового напылення покриттів : пат. 54496 Україна : МПК B23K 10/00 (2009) / Чорний А. В., Копилов В. І., Зіберов М. Л., Смирнов І. В., Селіверстов І. А. ; заявник і власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». № 54496 ; заявл. 20.05.2010 ; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.
15. Пристрій для оцінки процесу тертя і зношування матеріалів: пат. 66940 Україна : МПК G01N13/00 (2012) / Селіверстов І. А., Уваров В. А., Смирнов І. В. заявник і власник Херсонський національний технічний університет № 66940 ; заявл. 29.06.2011 ; опубл. 25.01.2012, Бюл. № 2/2012.

References

1. Vinogradov, A. Yu., & Agnew, S. R. (2004). Nanocrystalline materials: Fatigue. In *Encyclopedia of nanotechnology* (pp. 2269–2288). Marcel Dekker. <https://doi.org/10.2320/matertrans.42.74>
2. Karabulut, G., Beköz Üllen, N., Akyüz, E., & Karakuş, S. (2023). Surface modification of 316L stainless steel with multifunctional locust gum/polyethylene glycol-silver nanoparticles using different coating methods. *Progress in Organic Coatings*, 174, 107291. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107291>
3. Shtansky, D. V., et al. (2001). [Title not specified]. *Surface and Coatings Technology*, 148(2–3), 204–213.
4. Wu, P., Dii, H. M., Chen, X. L., Li, Z. Q., Bai, H. L., & Jiang, E. Y. (2004). Influence of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni-WC composite coatings. *Wear*, 257(1–2), 142–147. DOI: 10.1016/j.wear.2003.10.019

5. Liu, X., & Zhang, B. (2002). Effects of grinding process on residual stresses in nanostructured ceramic coatings. *Journal of Materials Science*, 37, 3229–3239. doi.org/10.1023/A:1016174731658
6. He, J., Ice, M., & Lavernia, E. J. (2000). Synthesis of nanostructured $\text{Cr}_3\text{C}_{2-25}(\text{Ni}_{20}\text{Cr})$ coatings. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 31A, 555–564. DOI:10.1007/s11661-000-0290-0
7. Levashov, E. A., Pogozhev, Yu. S., Kudryashov, A. E., Rupasov, S. I., & Levina, V. V. (2008). TiC–Ni-based composite materials dispersion-strengthened by nanoparticles for electrospray deposition. *Journal of Non-Ferrous Metals*, 49(5), 397–403. DOI:10.3103/S1067821208050167
8. Zenkin, N. A., & Kopylov, V. I. (2002). *Povyshenie ekspluatatsionnykh kharakteristik kompozitsionnykh materialov putem optimizatsii uprochniuiushchikh tekhnologii*. Holovna spetsializovana redaktsiia literatury movamy natsionalnykh menshyn Ukrainy.
9. Marcinauskas, L. (2010). Deposition of alumina coatings from nanopowders by plasma spraying. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 16(1), 47–51.
10. Smyrnov, I. V., Chornyi, A. V., Furman, V. K., & Dolhov, N. A. (2017). Vplyv nanodispersnykh modifikatoriv na strukturu i vlastyvoli plazmenno napylenykh pokryttiv. *Materialoznavstvo ta mashynobuduvannia*, (5). <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2017.5.94945>
11. Smyrnov, I. V., et al. (2011). Povyshenie iznosostoikosti plazmennykh pokrytii na osnove kompozitsionnogo poroshka s nanochastitsami SiO_2 . *Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta "KhPI". Seriia: Novye resheniia v sovremennykh tekhnologiakh*, (2), 70–74.
12. Senderowski, C., Vigilianska, N., Burlachenko, O., Grishchenko, O., Murashov, A., & Stepanyuk, S. (2023). Effect of APS spraying parameters on the microstructure formation of Fe_3Al intermetallics coatings using mechanochemically synthesized nanocrystalline Fe–Al powders. *Materials*, 16(4), 1669. DOI:10.3390/ma16041669
13. Liashko, O. V., Lazoryk, V. M., & Sieliverstov, I. A. (2025). Mekhanokhimichne lehuвання kompozytnykh poroshkiv Al–Si–hBN dlia nanesennia uschilniuiuchykh plazmovykh pokryttiv [Mechanochemical alloying of Al–Si–hBN composite powders for deposition of sealing plasma coatings]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 1(3(94)), 177–182.
14. Chornyi, A. V., Kopylov, V. I., Ziberov, M. L., Smyrnov, I. V., & Sieliverstov, I. A. (2010). *Device for plasma-arc spraying of coatings* (Ukraine Patent No. 54496; IPC B23K 10/00). National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Published November 10, 2010 (Bulletin No. 21).
15. Sieliverstov, I. A., Uvarov, V. A., & Smirnov, I. V. (2012). *Device for evaluating the process of friction and wear of materials* (Ukraine Patent No. 66940; IPC G01N13/00). Kherson National Technical University. Published January 25, 2012 (Bulletin No. 2/2012).

Дата першого надходження статті до видання: 07.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

Ю. Є. МЕШКОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-2506-7020

ВИРОБНИЧО-ТЕХНІЧНА БАЗА ПІДПРИЄМСТВ ЯК ОСНОВА ФОРМУВАННЯ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Актуальність статті полягає у визначенні варіантів технічного розвитку автотранспортних підприємств на основі дослідження взаємозв'язку між оновленням рухомого складу та розвитком виробничо-технічної бази. Реалізація оптимального варіанту технічного розвитку, який підвищить технічний рівень, ефективність та конкурентоспроможність автотранспортного підприємства.

Матеріальною основою автотранспортних підприємств для підтримання парку автомобілів у працездатному стані є виробничо-технічна база, тобто сукупність будівель, споруд, обладнання, оснастки та інструменту, які забезпечують технічне обслуговування, поточний ремонт та зберігання транспортних засобів і створюють необхідні умови для роботи персоналу.

Існуюча виробничо-технічна база має багато недоліків. Відставання виробничо-технічної бази від сучасних вимог істотно позначається на рівні працездатності автомобілів, а також матеріальних і трудових витратах на їхнє обслуговування та ремонт. Це, в свою чергу, зумовлює погіршення кінцевих результатів роботи підприємства.

Існуючі моделі і методи оцінки ефективності ВТБ недостатньо враховують різнопланові складові забезпечення ефективності і розвитку виробництва. Такі, як оцінка можливих напрямків підвищення виробництва, оцінка соціально-психологічних, ергономічних показників виробничої бази та інші. Всі ці моделі не враховують всі складові виробничо-технічної бази підприємства в комплексі.

Постійне зростання кількості СТО підвищує рівень конкуренції і призводить до більш жорсткої боротьби на ринку послуг. Щоб не втратити своєї ніші в сегменті ринку потрібно своєчасно і в потрібному обсязі розвивати виробничу базу підприємства та забезпечувати ефективність її функціонування.

Системні дослідження виробничо-технічної бази передбачають цілісний розгляд її функціонування, з урахуванням внутрішніх та зовнішніх зв'язків.

Задача оцінки ефективності функціонування виробничо-технічної бази підприємства є надважливою. Така оцінка повинна формуватися на врахуванні різних факторів, які впливають на її стан та ефективність.

Методика оцінки ефективності виробничо-технічної бази підприємства дозволяє визначати її раціональні напрямки, стан і шляхи розвитку та забезпечувати ефективність функціонування.

Ключові слова: автотранспортне підприємство, виробничо-технічна база; ефективність функціонування, транспортний засіб, технічний рівень.

YU. YE. MIESHKOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Systems and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-2506-7020

THE PRODUCTION AND TECHNICAL BASE OF ENTERPRISES AS A BASIS FOR THE DEVELOPMENT OF VEHICLE MAINTENANCE AND REPAIR SYSTEMS

The relevance of the article lies in determining the options for the technical development of motor transport enterprises based on the study of the relationship between the renewal of rolling stock and the development of the production and technical base. Implementation of the optimal option for technical development, which will increase the technical level, efficiency and competitiveness of the motor transport enterprise.

The material basis of motor transport enterprises for maintaining the fleet of vehicles in working condition is the production and technical base, that is, a set of buildings, structures, equipment, equipment and tools that provide maintenance, current repair and storage of vehicles and create the necessary conditions for the work of personnel.



The existing production and technical base has many shortcomings. The lag of the production and technical base from modern requirements significantly affects the level of performance of vehicles, as well as material and labor costs for their maintenance and repair. This, in turn, leads to a deterioration in the final results of the enterprise.

Existing models and methods for assessing the effectiveness of VTB do not sufficiently take into account the diverse components of ensuring the efficiency and development of production. Such as assessing possible directions for increasing production, assessing socio-psychological, ergonomic indicators of the production base, and others. All these models do not take into account all components of the production and technical base of the enterprise as a whole.

The constant increase in the number of service stations increases the level of competition and leads to a more fierce struggle in the services market. In order not to lose your niche in the market segment, it is necessary to develop the production base of the enterprise in a timely manner and to the required extent and ensure the efficiency of its functioning.

Systematic studies of the production and technical base involve a holistic consideration of its functioning, taking into account internal and external relationships.

The task of assessing the efficiency of the functioning of the production and technical base of the enterprise is extremely important. Such an assessment should be formed taking into account various factors that affect its condition and efficiency.

The methodology for assessing the efficiency of the production and technical base of the enterprise allows you to determine its rational directions, condition and ways of development and ensure the efficiency of its functioning.

Key words: motor transport enterprise, production and technical base; efficiency of functioning, vehicle, technical level.

Постановка проблеми

Ефективність експлуатації автомобільного транспорту багато в чому визначається рівнем технічної готовності рухомого складу. Одним з важливих резервів підвищення ефективності роботи технічної служби автотранспортних підприємств є поліпшення якості технічного обслуговування і поточного ремонту автомобілів.

Матеріальною основою автотранспортного підприємства для підтримання парку автомобілів у працездатному стані є виробничо-технічна база, тобто сукупність будівель, споруд, обладнання, оснастки та інструменту, які забезпечують технічне обслуговування, поточний ремонт та зберігання транспортних засобів і створюють необхідні умови для роботи персоналу.

Існуюча виробничо-технічна база має багато недоліків. Відставання виробничо-технічної бази від сучасних вимог істотно позначається на рівні працездатності автомобілів, а також матеріальних і трудових витратах на їхнє обслуговування та ремонт. Це, в свою чергу, зумовлює погіршення кінцевих результатів роботи підприємства.

Разом з тим, для успішного виконання масштабних і складних завдань, що стоять перед автомобільним транспортом, потрібно різко підвищити ефективність використання рухомого складу і, як наслідок, значно збільшити навантаження на виробничо-технічну базу автопідприємств.

Як показує аналіз, автотранспортні підприємства мають велику кількість транспортних засобів, термін використання яких перевищує амортизаційні строки та технічні можливості. Кількість вантажних автомобілів та автобусів з терміном експлуатації до 5 років в загальній кількості складає відповідно 6,0 % та 10,0 %, а з терміном експлуатації більше 8 років – відповідно 90,0 % і 81,0 % [1].

Така вікова структура парку транспортних засобів обумовлює погіршення технічного стану і рівня використання автомобілів, так як їхня експлуатація підтримується за рахунок капітального та поточних ремонтів з великими витратами матеріальних, трудових і фінансових ресурсів. Практика свідчить, що продуктивність рухомого складу, який пройшов амортизаційні терміни служби, порівняно з автомобілями з терміном служби до 3 років, менше в два з половиною рази.

З іншої сторони, автотранспортні підприємства через свій незадовільний фінансовий стан не можуть купувати та використовувати новий рухомий склад, який потребує менших витрат на експлуатацію, сучасне діагностичне та ремонтне обладнання, яке дозволить збільшити продуктивність праці ремонтного персоналу та зменшити його кількість.

Тому великого значення в розв'язанні завдань технічного розвитку автотранспортних підприємств слід надавати поліпшенню планування, проектування та організації робіт з удосконалення виробничо-технічної бази.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним із шляхів вирішення проблеми підвищення ефективності роботи автотранспортних підприємств (а також транспортних підрозділів, які працюють на госпдоговірних умовах) є їх технічний розвиток, тобто оновлення основних виробничих фондів підприємств, а саме: їх активної та пасивної частин [2]. Проте оновлення парку автомобілів часто вимагає зміни типу рухомого складу та перехід від автомобілів виробництва країн колишнього пострадянського простору до більш ефективних закордонних моделей. В багатьох випадках при оновленні автомобілів можлива ситуація, за якої нові автомобілі будуть значно відрізнятися від існуючого парку рухомого складу. Внаслідок цього виробничо-технічна база (ВТБ), яка створювалась на підприємстві роками під існуючий рухомий склад, буде не в змозі забезпечити підтримку в працездатному стані придбаних автомобілів. Це, в свою чергу, суттєво ускладнює прийняття керівництвом підприємств управлінських рішень стосовно визначення

напрямків технічного розвитку та їх реалізації [3]. Вирішення цих питань вимагає розробки науково обґрунтованих підходів визначення та управління напрямками технічного розвитку автотранспортного підприємства на основі дослідження варіантів їх реалізації з урахуванням взаємозв'язків між оновленням рухомого складу та розвитком його виробничо-технічної бази.

Формулювання мети статті

Незважаючи на значну кількість досліджень домогтися істотного підвищення технічного рівня виробництва можна, насамперед, за рахунок перебудови інвестиційної і структурної політики, концентрації ресурсів на найважливіших напрямках науково-технічного прогресу. Для технічної політики на сучасному етапі важливим є технічне переозброєння і реконструкція підприємств. При цьому на перший план ставляться питання вибору форм розвитку виробничо-технічної бази підприємства. Ефективність і якість капітального будівництва безпосередньо пов'язані з якістю проектно-кошторисної справи. У зв'язку з цим проекти на будівництво нових і реконструкцію існуючих об'єктів мають не тільки відповідати сучасним вимогам, а й враховувати основні тенденції розвитку автомобільного парку країни. Тому великого значення в розв'язанні завдань технічного розвитку автотранспортних підприємств слід надавати поліпшенню планування, проектування та організації робіт з удосконалення виробничо-технічної бази.

Метою статті є обґрунтування стратегічних напрямів розвитку автотранспортних підприємств з урахуванням сучасних стратегічних орієнтирів робіт з удосконалення виробничо-технічної бази.

Викладення основного матеріалу дослідження

Основна задача виробничо-технічної бази автотранспортних підприємств – забезпечення необхідного рівня технічної готовності для виконання перевезень при найменших трудових та матеріальних витратах.

Сучасний стан виробничо-технічної бази характеризується наступним [4]:

- відставання розвитку виробничо-технічної бази від темпів росту кількості автотранспортних засобів;
- порівняно невеликі розміри автотранспортних підприємств;
- недостатня оснащеність зон технічного огляду та ремонту площами та сучасним обладнанням;
- невідповідність потужностей виробничо-технічної бази обсягам робіт по технічному огляду та ремонту;
- зниження техніко-економічних показників роботи виробничо-технічної бази;
- недостатні капіталовкладення в розвиток виробничо-технічної бази;
- недосконалість структури виробничо-технічної бази;
- значне спрацювання виробничо-технічної бази;
- низький рівень спеціалізації та концентрації виробничо-технічної бази автотранспортних підприємств;
- велика різномарочність транспортних засобів в межах одного підприємства;
- слабкорозвинені коопераційні зв'язки.

Також визначено, що пріоритетним напрямом капіталовкладень є інвестиції в пасивну частину виробничо-технічної бази, які складають 80–85 %. Тільки близько 4–10 % припадає на технологічне устаткування і оснащення, які стосовно виробничо-технічної бази можна вважати активною частиною. Збільшення фондоозброєності впливає на поліпшення показників функціонування виробничо-технічної бази, що проявляється, наприклад, в зростанні коефіцієнта технічної готовності транспортних засобів. Значне зниження показника фондовіддачі є результатом недосконалої структури та екстенсивних методів розвитку виробничо-технічної бази, великого зносу основних засобів (понад 40 %). Низька питома вага активної частини виробничо-технічної бази позначається на показнику механоозброєності, фондовіддачі, продуктивності праці і плінності кадрів. Крім того, внаслідок низького рівня механоозброєності ростуть витрати на технічне обслуговування та ремонт, 65–70 % яких складає заробітна плата ремонтних працівників [5].

В процесах формування розвитку постає необхідність аналізу виробничо-технічної бази автотранспортних підприємств. На практиці існують різні методи визначення показників, які характеризують наявність потужностей та оцінку ефективності функціонування виробничо-технічної бази, що обумовлено специфікою експлуатації та обслуговування автотранспортних засобів (АТЗ). Існуючі методи зводяться до розрахунку обсягів робіт і на їх основі кількості постів або робітників, необхідних для здійснення робіт по технічному огляду і ремонту. Як правило, під час оцінки виробничо-технічної бази виявляються приховані резерви підприємств. В основу визначення обсягів робіт закладаються різні вихідні дані: кількість АТЗ, які знаходяться в районі обслуговуючого автотранспортних підприємств; кількість власних АТЗ, які обслуговуються (внутрішні клієнти); кількість заїздів на обслуговування.

Для аналізу стану виробничо-технічної бази використовують сукупність показників: структуру виробничо-технічної бази, ступінь забезпеченості автотранспортних підприємств виробничою базою, її стан в частині фізичного та морального зношення. До показників в натуральному та вартісному виразах відносяться: забезпеченість виробничо-технічної бази для виконання робіт по технічному огляду і ремонту; коефіцієнт придатності основних засобів; питома вага вартості виробничо-технічної бази в загальній вартості майна автотранспортного підприємства; фондоозброєність тощо. До оціночних показників також відносять коефіцієнт технічної готовності парку автотранспортних засобів, зношення основних засобів [6].

Існує велика кількість підходів щодо оцінки виробничо-технічної бази. Наприклад, Канарчук В. Є., і Лудченко О. А. [7; 8] вважають, що комплексний підхід висуває в якості головної вимоги системність показників, які характеризують стан виробничо-технічної бази. Такими показниками можуть бути: фондооснащеність; фондоозброєності ремонтних працівників, механоозброєності, фондовіддачі виробничо-технічної бази; забезпеченість виробничими площами для здійснення робіт по технічному обслуговуванню і ремонту автотранспортних засобів; пристосованість приміщень; придатність будівель і споруд; продуктивності праці і річна заробітна плата ремонтних працівників тощо.

Додатково наводиться уніфікована група показників використання виробничо-технічної бази, до якої відносяться: фондовіддача, фондомісткість, коефіцієнт змінності, коефіцієнт вибуття, коефіцієнт оновлення, коефіцієнт придатності, коефіцієнт зносу ВТБ.

ВТБ являє собою сукупність будівель, споруд, обладнання, призначених для надання різних видів послуг, а також для створення необхідних умов роботи персоналу. Для характеристики виробничо-технічної бази пропонується використовувати два основні показники: виробничу потужність та розмір виробничо-технічної бази. Виробнича потужність визначається кількістю вироблених послуг в натуральному або вартісному вираженні за певний період часу. Для автотранспортних підприємств, яке здійснює технічне обслуговування і ремонт автотранспортних засобів, таким показником є кількість комплексно обслуговуваних транспортних засобів на підприємстві за рік. Розмір виробничо-технічної бази визначається розміром живої та уречевленої праці, тобто кількістю працівників і виробничих засобів. Для підприємств автомобільного транспорту розмір виробничо-технічної бази може характеризуватися кількістю постів, на яких здійснюється технічне обслуговування і ремонт автотранспортних засобів. Не можна не погодитися, що запропонований підхід оцінки виробничо-технічної бази за кількістю постів обслуговування повніше, ніж інші показники, відображає загальний обсяг наданих послуг, проте він не позбавлений і певних недоліків. На кількість постів обслуговування істотно впливає кількість та клас автотранспортних засобів, які обслуговуються чи ремонтуються, тому необхідно брати до уваги кількість постів, на яких можуть обслуговуватися транспортні засоби середнього та великого класів.

Також оцінка виробничо-технічної бази здійснюється шляхом визначення складу основних засобів, до яких входять: основні виробничі фонди; основні невикористані фонди; нематеріальні активи.

Аналіз виробничо-технічної бази є відповідальним етапом, від якості виконання якого залежить ефективність прийнятих в подальшому управлінських рішень. Виділяються наступні групи показників оцінки виробничо-технічної бази: чисельність автотранспортних засобів і режим їх експлуатації; штат працівників підприємства, який визначається окремо за основними категоріями працюючих; показники, які характеризують територію підприємства; характеристики основних будівель і споруд; характеристика виробничих ділянок. Наведені показники оцінки основних фондів можна використовувати при розв'язанні різних загальних завдань економічного характеру. Однак, вони не дозволяють визначити відповідність виробничо-технічної бази автотранспортного підприємства кількості та класу автотранспортних засобів.

Ефективність використання автотранспортних засобів, оцінюється коефіцієнтом використання місткості, коефіцієнтом використання пробігу, коефіцієнтом технічної готовності, коефіцієнтом випуску парку на лінію та іншими. Зазначається, що ефективність роботи автомобільного транспорту залежить як від організації перевезень, так і від організації робіт по технічному обслуговуванню і ремонту [9].

Також до оціночних показників виробничо-технічної бази автопідприємств відносять такі, які характеризують певні кількісні параметри – наприклад, площі зон та постів для здійснення технічного обслуговування і ремонту.

Потужність виробничо-технічної бази автопідприємства в термінах теорії масового обслуговування можливо охарактеризувати кількістю приладів обслуговування. Під приладом обслуговування розуміється пост, на якому виконуються роботи по технічному обслуговуванню і ремонту. Кількісною мірою критерію якості функціонування може бути кількість відремонтованих автотранспортних засобів за одиницю часу або пропускна здатність при заданій якості всіх ремонтних робіт [10].

Важливим аспектом забезпеченості виробничо-технічної бази автопідприємства є наявність постів та ліній, які повинні бути укомплектовані відповідним обладнанням основного та допоміжного виробництва, підйомно-транспортним устаткуванням. Устаткування основного виробництва призначено для безпосереднього виконання робіт. Устаткування допоміжного виробництва служить для виконання операцій, які стосуються підготовки виробництва. Виробнича потужність автопідприємства характеризує можливий обсяг послуг по технічному обслуговуванню і ремонту при визначеному рівні техніки, технології та організації виробництва. Підвищення ефективності використання обладнання забезпечується двома шляхами: за часом і за продуктивністю. Ступінь використання виробничих потужностей характеризується такими екстенсивними коефіцієнтами: загальним, інтенсивним,

Потреба підприємства в кадрах залежить від запланованих обсягів виробництва, умов роботи, продуктивності праці, технологічних та організаційних умов виробництва, інших факторів. Необхідна кількість ремонтних працівників визначається у відповідності з виробничою програмою і трудомісткістю робіт по технічному

обслуговуванню і ремонту транспортних засобів. Для оцінки рівня продуктивності праці використовуються показники виробітку і трудомісткості.

Ефективність функціонування автотранспортних підприємств оцінюється системою техніко-експлуатаційних показників, які характеризують кількість та якість виконаної роботи, до них відносять: коефіцієнт технічної готовності, коефіцієнт випуску парку на лінію, коефіцієнт використання пробігу, сумарний річний пробіг автотранспортних засобів автопідприємства, облікову кількість автотранспортних засобів, кількість календарних днів в році простоїв автотранспортних засобів по технічному обслуговуванню і ремонту (авто-дні), наявність на автопідприємстві груп технологічно сумісних автотранспортних засобів і їх кількість в кожній з груп. Джерелами інформації для здійснення аналізу ефективності функціонування автопідприємств є дані бухгалтерських, податкових та статистичних звітів, методичні та практичні аспекти обліку. Показником, який визначає вартісну оцінку ресурсів, які використовуються у процесі виробництва послуг, є собівартість.

Ще однією характеристикою, яку необхідно враховувати при аналізі виробничо-технічної бази, є виділення технологічно сумісних груп автотранспортних засобів. Для їх визначення необхідно отримати початкові данні для визначення груп (марок та моделей). Потім визначається приналежність кожного транспортного засобу до певного класу (малий, середній, великий). Наступним кроком є відокремлення конструктивних подібностей моделей, що дозволяє організувати роботи по технічному обслуговуванню і ремонту з використанням однієї і тієї ж технологічної бази (технології організації робіт, постів, устаткування, кваліфікації ремонтних працівників).

За організацією виробничої діяльності автотранспортні підприємства (АТП), які створювались за часів планової економіки, підрозділяються на комплексні та кооперовані. До комплексних АТП відносяться самостійні підприємства, які здійснюють транспортну роботу, зберігання та всі види по технічному обслуговуванню і ремонту. Розмір таких АТП залежить від чисельності та типу автотранспортних засобів. Розміри комплексних АТП, створених за часів планової економіки варіювались в наступних межах: для вантажних – від 100 до 500 і більше одиниць транспортних засобів, для автобусних – від 100 до 400, для легкових таксомоторів – від 100 до 1100 одиниць [11]. Рівень розвитку виробничо-технічної бази таких автопідприємств визначається розмірами і формами організації виробничої діяльності. На транспорті загального користування переважно отримали розвиток автономні (комплексні) АТП, в яких виконуються всі роботи по технічному обслуговуванню і ремонту без спеціалізації та кооперації виробництва, що вимагає наявності на кожному підприємстві всього комплексу виробничих і допоміжних ділянок, складських, технічних та допоміжних приміщень, а також оснащення виробничо-технічної бази всією номенклатурою робочих постів і технологічного обладнання. Середній розмір таких АТП становить 260–280 АТЗ. Виробничо-технічна база таких підприємств, як правило, була недостатньо обладнана сучасним технологічним обладнанням, що призводило до великих витрат на підтримку АТЗ в технічно справному стані та до збільшення простоїв в очікуванні технічного огляду і ремонту. Коефіцієнт технічної готовності на таких АТП не перевищував 0,7, а коефіцієнт випуску – 0,5. Ще гірші показники були на дрібних автотранспортних підприємствах. Також відомо, що виробничо-технічні бази, функціонуючих за часів планової економіки АТП, не в повному обсязі забезпечувала покладені на неї функції. Так, в ряді АТП чисельність автотранспортних засобів в 1,5–2 рази перевищувала можливості виробничо-технічної бази, закладені в проектних рішеннях. Крім того, геометричні параметри елементів виробничо-технічної бази не відповідали параметрам автотранспортних засобів, які експлуатувалися. Враховуючи вищезазначене та структуру функціонуючих в наш час автопідприємств, середня кількість АТЗ (автобусів) яких становить 5–6 одиниць, можна зробити припущення про наявність на автопідприємстві значного обсягу вільних потужностей виробничо-технічної бази, які можна використовувати як основу для формування партнерства в розвитку систем технічного обслуговування і ремонту автотранспортних засобів.

Висновки

Виходячи з проведеного огляду визначено, що для оцінки виробничо-технічної бази використовують значну кількість показників: структуру фондів, ступінь забезпеченості автопідприємства виробничою базою, стан виробничо-технічної бази в частині її фізичного та морального зношення. До показників в натуральному та вартісному виразах відносять: забезпеченість виробничими потужностями для виконання робіт по технічному обслуговуванню і ремонту автотранспортних засобів, коефіцієнт придатності основних фондів, питому вагу вартості виробничо-технічної бази в загальній вартості фондів, фондоозброєність тощо. Науковці пропонують різні підходи для оцінки автотранспортних підприємств, які надають послуги по технічному обслуговуванню і ремонту автотранспортних засобів, проте до цього часу не існує єдиної методики, яка б забезпечувала їх системну оцінку. У загальному випадку, система оціночних показників повинна задовольняти наступним вимогам: відображати реальний стан автотранспортного підприємства та мати об'єктивний зміст; піддаватися точній кількісній та якісній оцінці; окремі показники повинні доповнювати, але не дублювати і не суперечити один одному; забезпечувати єдність планування та обліку; забезпечувати порівнянність оцінки організації по технічному обслуговуванню і ремонту автотранспортних засобів в різних автопідприємствах. Однією з методик, яка відповідає вищезазначеним вимогам, є система збалансованих показників, яка оцінює роботу підприємства на основі чотирьох збалансованих груп показників: фінанси, клієнти, внутрішні бізнес-процеси, персонал.

Список використаної літератури

1. Державна служба статистики України. (2025) Режим доступу <https://ukrstat.gov.ua/>.
2. Аулін В. В., Голуб Д. В., Гриньків А. В., Лисенко С. В. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія / за заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В. В., Кропивницький: ТОВ «КОД», 2017. 370с.
3. Аулін В. В., Гриньків А. В., Замота Т. М. Забезпечення та підвищення експлуатаційної надійності транспортних засобів на основі використання методів теорії чутливості. Вісник інженерної академії України. 2015. № 3. С. 66–72.
4. Біліченко В. В., Крещенецький В. Л., Романюк С. О., Смирнов Є. В. Виробничо-технічна база підприємства автомобільного транспорту. Навчальний посібник. Вінниця, ВНТУ, 2013. 182 с.
5. Чабанний В. Я. Тенденції розвитку виробничо-технічної бази автомобільного транспорту / В. Я. Чабанний, І. М. Осипов // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, автоматизація, галузеве машинобудування. 2011. Вип. 24(2) с. 82–90. Режим доступу: https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/24_2/18.pdf
6. Біліченко В. В., Кужель В. П. Моделювання технологічних процесів підприємств автомобільного транспорту. Навчальний посібник. Вінниця, ВНТУ, 2013. 162 с.
7. Канарчук В. Є. Організація виробничих процесів на транспорті в ринкових умовах. / В. Є. Канарчук та ін. Київ. Логос. 1996. 348 с.
8. Лудченко О. А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: організація і управління. Київ : Знання, 2004. 478 с.
9. Карабиньош С. С., Новицький А. В., Ружило З. В. Проектування підприємств технічного сервісу будівельної техніки. Навчальний посібник. Київ, НУБіП України, 2019. 171 с.
10. Волков В. П., Мармут І. А., Кривошапов С. І., Белов В. І. Проектування підприємств автомобільного транспорту. Підручник. Під загальною редакцією В.П. Волкова. Харків : ХНАДУ, 2013. 288 с.
11. Войтюк В. Д., Бондар С. М., Шимко Л. С. Проектування і розрахунок автосервісних підприємств. Навчальний посібник. Ніжин, ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2021. 568 с.

References

1. State Statistics Service of Ukraine. (2025) Retrieved from <https://ukrstat.gov.ua/>.
2. Aulin V. V., Holub D. V., Hryniv A. V., & Lysenko S. V. (2017). Methodological and theoretical foundations of ensuring and increasing the reliability of the functioning of automobile transport systems: monograph, Prof. Aulin V. V. edited by Kropyvnytskyi: LLC «KOD», P 370.
3. Aulin V. V., Hryniv A. V., & Zamota T. M. (2015). Ensuring and increasing the operational reliability of vehicles based on the use of sensitivity methods. Visnyk of the Engineering Academy of Ukraine. № 3. pp. 66–72.
4. Bilichenko V. V., Kreshchenetsky V. L., Romanyuk S. O., & Smirnov E. V. (2013). Production and technical base of a motor transport enterprise. Textbook. Vinnytsia, VNTU. 182 p.
5. Chabanny V. Ya., & Osypov I. M. (2011). Trends in the development of the production and technical base of motor transport. Collection of scientific papers of the Kirovohrad National Technical University. Technology in agricultural production, automation, branch machine building. Issue 24(2) pp. 82–90. Access mode: https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/24_2/18.pdf.
6. Bilichenko V. V., & Kuzhel V. P. (2013). Modeling of technological processes of motor transport enterprises. Textbook. Vinnytsia, VNTU,. 162 p.
7. Kanarchuk V. E. (1996). Organization of production processes in transport in market conditions. / V. E. Kanarchuk et al. Kyiv. Logos. 348 p.
8. Ludchenko O. A. (2004). Maintenance and repair of vehicles: organization and management. Kyiv. Znannia, 478 p.
9. Karabyunyosh S. S., Novytsky A. V., & Ruzhylo Z. V. (2019). Design of construction machinery technical service enterprises. Textbook. Kyiv, NUBiP of Ukraine, 171 p.
10. Volkov V. P., Marmut I. A., Kryvoshapov S. I., Belov V. I. (2013) Design of road transport enterprises. Textbook. Under the general editorship of V. P. Volkov. Kharkiv : KhNADU. 288 p.
11. Voytyuk V. D., Bondar S. M., & Shymko L. S. (2021) Design and calculation of car service enterprises. Textbook. Nizhyn, LLC “Publishing house “Aspect-Poligraph”. 568 p.

Дата першого надходження статті до видання: 11.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

С. М. МІНАКОВА

докторка економічних наук, професорка,
професорка кафедри машинобудування
Одеська державна академія будівництва та архітектури
ORCID: 0000-0002-9931-8291

О. В. СТЕПАНОВ

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри тракторів та автомобілів
Національний університет біоресурсів і природокористування України
ORCID: 0000-0003-4954-2532

Т. В. ВОЛОБУЄВА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри машинобудування
Одеська державна академія будівництва та архітектури
ORCID: 0000-0003-0340-3326

СТРАТЕГІЯ УПРАВЛІННЯ МЕХАНІЗМОМ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСУ

У статті розглянуто стратегію управління механізмом розвитку транспортного комплексу. Зазначено, що сучасний транспортний комплекс є ключовим чинником розвитку національної економіки. Це забезпечує мобільність громадян, інтеграцію виробництва та торгівлі, а також вихід країни на міжнародні ринки. Стратегія управління механізмом розвитку транспортного комплексу (надалі – Стратегія) інтегрує державні пріоритети, потреби бізнесу та суспільства, забезпечує розвиток інфраструктури, цифровізацію процесів, впровадження інновацій, енергоефективність та високий рівень безпеки перевезень. Відповідно до цього метою дослідження є розгляд стратегії управління механізмом розвитку транспортного комплексу як сукупності методів, засобів і процедур, за допомогою яких забезпечується ефективна взаємодія суб'єктів транспортної системи з урахуванням державних пріоритетів, інтересів бізнесу та суспільства. Встановлено, що національна транспортна стратегія України до 2030 року та операційний план на 2025–2–27 роки визначають пріоритети розвитку, акцентують відновлення інфраструктури та реалізацію проєктів у воєнний та післявоєнний періоди. При цьому механізм управління транспортним комплексом охоплює організації, економічні та процедурні елементи, що забезпечують координацію дій учасників системи, стабільність функціонування та ефективне використання ресурсів. Доведено, що прозорість, відкритість і гнучкість забезпечують ефективне прийняття рішень, оперативну адаптацію та оперативне використання ресурсів. Зокрема, механізми зворотного зв'язку сприяють залученню громадськості, коригуванню управлінських дій та підвищенню довіри до державної політики. Зроблено висновок, що Стратегія є інструментом підвищення ефективності галузі, інтеграції сучасних технологій, контролю та адаптивного управління, що сприяє сталому економічному розвитку країни. При цьому розробка Стратегії потребує аналізу стану системи, обліку регіональних особливостей та специфіки різних транспортних структур.

Ключові слова: стратегія управління, транспортний комплекс, модернізація, інноваційні технології, механізм управління, безпека транспорту.

S. M. MINAKOVA

Dr. Economist Sciences, Professor,
Professor at the Department of Mechanical Engineering
Odesa State Academy of Construction and Architecture
ORCID: 0000-0002-9931-8291

O. V. STEPANOV

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Tractors and Cars
National University of Bioresources and Environmental Management of Ukraine
ORCID: 0000-0003-4954-2532



T. V. VOLOBUYEVA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering
Odesa State Academy of Construction and Architecture
ORCID: 0000-0003-0340-3326

STRATEGY FOR MANAGING THE TRANSPORT COMPLEX DEVELOPMENT MECHANISM

The article discusses the strategy for managing the transport complex development mechanism. It notes that the modern transport complex is a key factor in the development of the national economy. It ensures the mobility of citizens, the integration of production and trade, and the country's access to international markets. The strategy for managing the transport complex development mechanism (hereinafter referred to as the Strategy) integrates state priorities, business and society needs, ensures infrastructure development, process digitalization, innovation implementation, energy efficiency, and a high level of transport safety. Accordingly, the aim of the study is to consider the strategy for managing the transport complex development mechanism as a set of methods, means, and procedures that ensure effective interaction between transport system entities, taking into account state priorities and the interests of business and society. It is shown that Ukraine's national transport strategy until 2030 and the operational plan for 2025-2027 define development priorities, emphasizing infrastructure restoration and project implementation during the war and post-war periods. At the same time, the transport complex management mechanism covers organizations, economic and procedural elements that ensure coordination of the system participants' actions, stable functioning, and effective use of resources. It has been proven that transparency, openness, and flexibility ensure effective decision-making, rapid adaptation, and efficient use of resources. In particular, feedback mechanisms contribute to public involvement, adjustment of management actions, and increased trust in public policy. It is concluded that the Strategy is a tool for improving the efficiency of the industry, integrating modern technologies, control, and adaptive management, which contributes to the sustainable economic development of the country. At the same time, the development of the Strategy requires an analysis of the state of the system, taking into account regional characteristics and the specifics of various transport structures.

Key words: management strategy, transport complex, modernization, innovative technologies, management mechanism, transport safety.

Постановка проблеми

Сучасна транспортна система як ключовий елемент національної економіки забезпечує мобільність громадян, ефективну логістичну взаємодію, інтеграцію виробництва та торгівлі, а також вихід країни на міжнародні ринки. Її розвиток визначається не лише технічним прогресом і впровадженням інноваційних технологій, а й здатністю державних інституцій та бізнесу формувати ефективну стратегію управління, модернізації та стабільного функціонування транспортної сфери.

Стратегія управління механізмом розвитку транспортного комплексу (надалі – Стратегія) має базуватися на врахуванні багатовекторних завдань: модернізації інфраструктури, цифровізації транспортно-логістичних процесів, впровадженні інноваційних рішень, розвитку екологічно чистого транспорту, підвищенні енергоефективності, а також забезпечення високого рівня безпеки перевезень. Її основне завдання – інтегрувати державні пріоритети, потреби бізнесу та запити суспільства, що потребує узгодження регуляторної політики, забезпечення інвестиційної підтримки та активної міжгалузевої взаємодії.

Стратегія виконує роль не лише засобу підвищення результативності транспортної сфери, а й чинника, що забезпечує довгостроковий економічний розвиток держави. Для її ефективного впровадження необхідна багатовимірною модель дій, яка поєднує технологічні інновації, інвестиційну відкритість, екологічну свідомість і включення України до світової транспортно-логістичної системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження в галузі управління транспортним комплексом України зосереджені на різних підходах. Зокрема, на аналізі взаємозв'язків між інноваційними технологіями, ефективністю транспортних систем і дотриманням екологічних стандартів. Науковці, серед яких Біліченко В. В. [4], Власенко В. А. [5], Мартиненко В. М. [6], Сирийчик Т. [8] та інші пропонують методики моніторингу та оцінки ефективності управлінських проєктів з орієнтацією на довгострокові економічні та соціальні результати. Особлива увага приділяється ролі інфраструктурних ініціатив у забезпеченні сталого розвитку.

Водночас Уряд ухвалив оновлену Національну транспортну стратегію України до 2030 року та затвердив операційний план заходів на 2025–2027 роки [3]. Це стратегічний документ визначає національні пріоритети, цілі та операційні заходи для розвитку транспортної системи України. Були прийняті офіційні документи й методичні матеріали, що відображають поточну урядову політику і практичні інструменти реалізації проєктів у транспорті в умовах воєнного та післявоєнного відновлення [7].

Публікації щодо реформування державного управління України [1, 2, 4–6, 8] розвивають методологію інтеграції комплексної системи екологічної, соціальної та корпоративної управлінської відповідальності – ESG та

принципів сталого розвитку в управлінські процеси. Проте залишається проблемою недостатнє впровадження цих принципів у стратегію управління механізмом розвитку транспортного комплексу через складність застосування екологічних технологій з врахуванням соціальних потреб.

Формулювання мети дослідження

Розглянути стратегію управління механізмом розвитку транспортного комплексу як сукупність методів, засобів і процедур, за допомогою яких забезпечується ефективна взаємодія суб'єктів транспортної системи з урахуванням державних пріоритетів, інтересів бізнесу та суспільства.

Викладення основного матеріалу дослідження

Механізм управління науковці трактують як сукупність організаційних, економічних і процедурних елементів, що забезпечують злагоджену та взаємопов'язану діяльність усіх частин системи управління [9–10]. Він розглядається як основа стратегічного розвитку, оскільки формує цілісний вплив на керований об'єкт, беручи до уваги взаємодію підсистем та зовнішніх факторів. Завдяки узгодженому використанню методів, інструментів і регламентів механізм управління підтримує стабільність функціонування, підвищує раціональність використання ресурсів та сприяє поступальному розвитку організаційних структур.

Розглядаючи ключові чинники розвитку транспортного комплексу відзначимо, що механізм управління становить основу системи стратегічного прогресу транспортної галузі. Він охоплює сукупність методів, інструментів, способів і процедур, що призначені для цілеспрямованого впливу на об'єкт управління з метою забезпечення належної роботи системи й досягнення запланованих результатів [5, 6].

Метою управління механізмом розвитку транспортного комплексу є своєчасне, повне і якісне задоволення потреб користувачів, захист їхніх прав, забезпечення безпеки перевезень та підтримка стабільного розвитку галузі під державним контролем [3]. Він розглядається як система методів, інструментів і процедур, що координують взаємодію учасників транспортної інфраструктури. Крім того, він включає планування, організацію, стимулювання, контроль процесів, а також впровадження цифрових сервісів, телематики та штучного інтелекту для прийняття ефективних управлінських рішень [8].

Суть управління механізмом розвитку транспортного комплексу полягає у цілеспрямованому комплексному впливі органів управління на підприємства транспортної сфери через проектно-програмні інструменти та державний контроль для реалізації стратегічних пріоритетів [8]. Контроль виступає ключовою функцією, що забезпечує перевірку виконання завдань, оцінку відповідності результатів встановленим нормам і цілям, своєчасне коригування рішень, аналіз інформації про діяльність об'єктів управління. Зокрема, виявлення відхилень та впровадження заходів для підтримання якості продукції, послуг та екологічної безпеки.

Управління механізмом розвитку транспортного комплексу ускладнюється низкою системних проблем, що пов'язані зі стратегічними орієнтирами транспортної галузі [2, 3]. Серед основних факторів – значний знос виробничих фондів, обмежене фінансування та недостатні інвестиції, що гальмують модернізацію інфраструктури. Недосконалі лізингові механізми, слабка регуляторна підтримка та низьке використання транзитного потенціалу стримують ефективність роботи галузі. Це негативно впливає на безпеку транспортних перевезень та рівень аварійності. Який перевищує європейські стандарти, що потребує посилення контролю та регулювання.

Відповідно до цього Стратегію слід розглядати як узагальнену модель цілеспрямованих дій, спрямованих на досягнення конкретних управлінських і соціально-економічних цілей. Стратегія передбачає раціональний розподіл матеріальних, фінансових та кадрових ресурсів, а також системне врахування критеріїв оцінки результативності.

Розробка Стратегії починається з аналізу внутрішніх процесів управління та зовнішніх умов функціонування системи. Недооцінка цього аналізу підвищує ризик прийняття необґрунтованих рішень із негативними довгостроковими наслідками [1, 2].

Стратегія повинна базуватися на комплексному аналізі стану та проблем розвитку системи, враховуючи взаємозв'язок із загальними соціально-економічними пріоритетами країни та глобальними стратегічними тенденціями [3]. Вона розглядається як цілісний комплекс заходів, спрямований на досягнення довгострокових цілей транспортної галузі з урахуванням ролі кожного виду транспорту та реальних умов і обмежень розвитку. Серед основних завдань Стратегії – аналіз зовнішнього і внутрішнього середовища та формування стратегічного бачення [3, 8].

Ключовим етапом впровадження Стратегії є її комплексна оцінка, яка передбачає перевірку того, наскільки обрана Стратегія враховує критично важливі чинники, сприяє досягненню визначених цілей та відповідає вимогам сучасного зовнішнього середовища [4]. Оцінка також охоплює аналіз здатності транспортної організації використовувати нові можливості, адаптуватися до змін і мінімізувати ризики, що виникають під час реалізації стратегічних планів.

Формування Стратегії потребує комплексного врахування специфіки як наявних, так і розвивальних транспортних структур, регіональних особливостей, які визначають ефективність функціонування системи. При розробці Стратегії слід всебічно враховувати особливості вже наявних та тих, що активно формуються, транспортних структур.

Разом із цим необхідно приділяти увагу галузевим регіональним умовам, адже вони значно впливають на ефективність роботи системи. Водночас транспортний комплекс розглядається державою як єдиний об'єкт управління, що потребує узгодженої інтегрованої політики, узгодження ресурсів та координації стратегічних дій на всіх рівнях.

Елементами ефективної Стратегії є прозорість і відкритість, які забезпечують ясність прийняття рішень і зміцнюють довіру зацікавлених сторін. Гнучкість Стратегії дозволяє оперативно реагувати на зміни внутрішнього та зовнішнього середовища, забезпечуючи адаптивне управління.

Стратегія має ґрунтуватися на ключових методологічних принципах, притаманних системі стратегічного управління (табл. 1).

Таблиця 1

Принципи створення стратегії управління механізмом розвитку транспортного комплексу

Найменування принципу	Сутність принципу
Системність	Обґрунтування Стратегії та комплексу програм розвитку стратегічних ініціатив вимагає врахування основних передумов і обмежень, характерних управлінню. Такий підхід дозволяє забезпечити системне планування, ефективну координацію ресурсів, визначення пріоритетів розвитку
Безперервність	Застосування даних моніторингу виконання Стратегії та програми розвитку, уточнення її проєктів і внесення необхідних корективів як у саму стратегічну програму, так і в процес її впровадження
Ефективність	Механізм програмно-цільового управління стратегічними змінами функціонує таким чином, щоб забезпечувати досягнення визначених цілей і рівня розвитку стратегії з мінімальними ресурсними витратами
Адаптивність	Аналіз необхідних коригувань у джерелах фінансування та цілеспрямоване регулювання факторів зовнішнього середовища з метою створення сприятливих умов для функціонування транспортної системи
Інтеграція ресурсів	Здійснення Стратегії має базуватися на концентрації необхідних фінансових ресурсів через впровадження багатоканальних схем фінансування
Цілеспрямованість і пріоритетність	Процес стратегічного розвитку держави та її регіонів має базуватися на плануванні, координації та впровадженні заходів, спрямованих на підвищення економічної, соціальної та інфраструктурної результативності
Гласність і відкритість	Своєчасне та всебічне повідомлення учасників впровадження Стратегії про результати її моніторингу, а також про досягнення у виконанні конкретних програм і планів, для фахівців та представників громадськості

Рациональне поєднання ресурсів Стратегії сприяє їх оптимальному використанню. При цьому чітке визначення пріоритетів концентрує зусилля на виконанні основних стратегічних завдань, підвищуючи загальну ефективність розвитку організації.

При розробці Стратегії важливим елементом сучасного управління є активне застосування механізмів зворотного зв'язку. Вони забезпечують систематичне отримання та аналіз інформації від громадян, експертів і зацікавлених сторін щодо ефективності управлінських рішень. Зворотний зв'язок дозволяє швидко реагувати на зміни, коригувати дії, виявляти проблеми, оптимізувати ресурси, підвищувати прозорість процесів і формувати довіру між державою та суспільством.

Слід відзначити, що регулярний збір відгуків дозволяє оцінювати відповідність реалізованих заходів стратегічним цілям, вчасно виявляти відхилення та коригувати управлінські дії. Це підвищує ефективність рішень, сприяє раціональному використанню ресурсів і формує прозору систему контролю. Накопичені дані стають основою для розвитку Стратегії, роблячи її гнучкою й адаптивною до змін, що підвищує результативність державної політики.

Отже, постійне використання зворотного зв'язку демонструє відкритість влади до діалогу, посилює довіру населення та стимулює громадську участь. Систематичний аналіз отриманих оцінок допомагає виявляти слабкі місця Стратегії, удосконалювати управлінські процеси й адаптувати їх до зовнішніх викликів. При цьому важливо забезпечити сталість такого механізму, використовуючи цифрові платформи для оперативного отримання й опрацювання інформації.

Висновки

Стратегія управління механізмом розвитку транспортного комплексу є цілісним комплексом методів, процедур і інструментів, що забезпечують ефективне функціонування галузі, координацію суб'єктів системи та досягнення стратегічних цілей. Результативність Стратегії залежить від здатності інтегрувати сучасні технології, забезпечувати контроль, оперативно реагувати на зміни та враховувати специфіку розвитку галузі.

Стратегія повинна ґрунтуватися на глибокому аналізі стану системи, передбачати довгострокові цілі, бути прозорою, адаптивною та підтримуватися механізмами зворотного зв'язку. Саме регулярний моніторинг і залучення громадськості підсилюють ефективність Стратегії. Зокрема, сприяють оптимальному використанню ресурсів та підвищують довіру до державної політики. Тобто розвиток транспортної системи України можливий за умов інтеграції ресурсів, посилення контролю, інновацій та стратегічного бачення, що є тематикою подальших досліджень.

Список використаної літератури

1. Деякі питання реформування державного управління в Україні : розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.07.2021 № 831-р (зі змінами станом на 23.12.2022). Київ : КМУ, 2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/831-2021-p> (дата звернення: 07.12.2025).
2. Державна стратегія регіонального розвитку на 2021–2027 роки : постанова Кабінету Міністрів України від 05.08.2020 № 695 (зі змінами станом на 13.03.2025). Київ : КМУ, 2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/695-2020-p> (дата звернення: 07.12.2025).
3. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження оперативного плану заходів з її реалізації на 2025–2027 роки : постанова Кабінету Міністрів України від 27.12.2024 № 1550. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF> (дата звернення: 07.12.2025).
4. Біліченко В. В., Романюк С. О. Системна модель управління проектами стратегій розвитку автотранспортних організацій за стадіями життєвого циклу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2013. № 6. С. 102–107.
5. Власенко В. А. Механізм організаційного управління: сутність та структура. *Економіка та держава*. 2021. № 4. С. 23–27.
6. Мартиненко В. М. Механізми державного управління: сутність та класифікація. *Державне управління: удосконалення та розвиток*. 2020. № 6. С. 1–8.
7. Міністерство інфраструктури України. Офіційні політики, програми та аналітичні матеріали у сфері розвитку транспорту [Електронний ресурс]. Київ, 2017–2025. URL: <https://mtu.gov.ua/> (дата звернення: 06.12.2025).
8. Транспортна політика України та її наближення до стандартів Європейського Союзу / Т. Сирийчик, А. Фургалський, Х. Клімкевич, М. Камола, Т. Дяченко, М. Пугачов, О. Філіпенко ; за ред. М. Свенціцького. Київ : *Blue Ribbon Analytical and Advisory Center*, 2010. 102 с.
9. European Bank for Reconstruction and Development. Transport Sector Strategy (2019–2024) [Electronic resource]. London : EBRD, 2019. URL: <https://www.ebrd.com/> (accessed: 06.12.2025).
10. European Commission. TEN-T policy and EU transport infrastructure instruments (regulations, guidelines, maps) [Electronic resource]. Brussels, 2013–2021. URL: <https://transport.ec.europa.eu/> (accessed: 06.12.2025).
11. World Bank. Strategy and notes on transport sector investment and resilience (Strategic Transport Model for Ukraine) [Electronic resource]. Washington, D.C., 2024–2025. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/> (accessed: 06.12.2025).

References

1. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2021). Some issues of reforming public administration in Ukraine (Resolution No. 831-r of July 21, 2021, as amended December 23, 2022). <https://zakon.rada.gov.ua/go/831-2021-p>
2. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2020). State strategy for regional development for 2021–2027 (Resolution No. 695 of August 5, 2020, as amended March 13, 2025). <https://zakon.rada.gov.ua/go/695-2020-p>
3. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024). On the approval of the National Transport Strategy of Ukraine until 2030 and the operational plan of measures for its implementation in 2025–2027 (Resolution No. 1550 of December 27, 2024). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF>
4. Bilichenko, V. V., & Romaniuk, S. O. (2013). System model of project management of development strategies for motor transport organizations by stages of their life cycle. *Vinnitsia Polytechnic Institute Bulletin*, (6), 102–107.
5. Vlasenko, V. A. (2021). Mechanism of organizational management: Essence and structure. *Economy and State*, (4), 23–27.
6. Martynenko, V. M. (2020). Mechanisms of public administration: Essence and classification. *Public Administration: Improvement and Development*, (6), 1–8.
7. Ministry of Infrastructure of Ukraine. (2017–2025). Official policies, programs, and analytical materials on transport development. <https://mtu.gov.ua/>
8. Syryichyk, T., Furhalskii, A., Klimkevich, Ch., Kamola, M., Diachenko, T., Puhachov, M., & Filipenko, O. (2010). Transport policy of Ukraine and its approximation to European Union standards (M. Swienczicki, Ed.). *Blue Ribbon Analytical and Advisory Center*.
9. European Bank for Reconstruction and Development. (2019). Transport sector strategy (2019–2024). <https://www.ebrd.com/>
10. European Commission. (2013–2021). TEN-T policy and EU transport infrastructure instruments (regulations, guidelines, maps). <https://transport.ec.europa.eu/>
11. World Bank. (2024–2025). Strategy and notes on transport sector investment and resilience (Strategic Transport Model for Ukraine). <https://openknowledge.worldbank.org/>

Дата першого надходження статті до видання: 04.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

В. С. ПАРНЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-1450-2744

Є. В. КОРБУТ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-1221-4052

ЕКОЛОГІЧНО ОРІЄНТОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ З'ЄДНАННЯ ТА СКЛАДАННЯ У КОНТЕКСТІ СТАЛОГО ВИРОБНИЦТВА

У статті виконано огляд екологічно орієнтованих технологій з'єднання та складання як одного з ключових інструментів впровадження принципів сталого виробництва та циркулярного дизайну. Показано, що саме рішення щодо типу з'єднання (розбірні механічні, нерозбірні, гібридні та керовано-роз'ємні) визначають ремонтпридатність виробів, можливість модульної заміни компонентів, ресурсоефективність технічного обслуговування, а також реалістичність демонтажу і розділення матеріалів наприкінці життєвого циклу. З позицій життєвого циклу виробу проаналізовано, як вибір з'єднань впливає на формування «чистих» матеріальних потоків для повторного використання та перероблення, і чому традиційні нерозбірні вузли (зокрема клейові системи з високою стійкістю та заливки) часто стають бар'єром для циркулярності, спричиняючи руйнівний демонтаж, змішування матеріалів і втрату цінності вторинної сировини.

Окрему увагу приділено сучасним напрямкам «екологізації» адгезивних технологій: зменшенню токсичності та емісій, відмові від небезпечних компонентів, оптимізації енергомісткості процесів полімеризації, а також розвитку керовано-роз'ємних (debonding-on-demand) клейових систем, здатних забезпечувати міцність у експлуатації та прогнозоване роз'єднання під час ремонту або перероблення. Наголошено, що практична ефективність таких рішень визначається не лише адгезійною міцністю, а й довготривалою надійністю, стабільністю властивостей при старінні, технологічною відтворюваністю та можливістю масштабування у масовому виробництві. Розглянуто приклади галузей, у яких екологічні вимоги найбільше впливають на технології складання: автомобілебудування (модульні вузли, багатоматеріальні конструкції), електроніка (ремонтпридатність, зменшення електронних відходів), а також протезування і медичні вироби (біосумісні полімери та сумісність екологічних рішень із вимогами безпеки людини).

У результаті узагальнено ключові критерії вибору технологій з'єднання для сталого виробництва та сформульовано проблемні питання, що потребують подальших досліджень: недостатня формалізація інженерних метрик демонтажності й ремонтпридатності на рівні вузла, обмеженість кількісних моделей екологічної доцільності LCA та LCI (Life Cycle Assessment – оцінювання життєвого циклу та Life Cycle Inventory – інвентаризація життєвого циклу) для порівняння альтернативних з'єднань, а також дефіцит довгострокових експериментальних даних щодо керованого роз'єднання адгезивних систем. Зроблено висновок, що найбільш перспективними є комплексні стратегії, які поєднують модульність, розбірність, гібридні з'єднання та реверсивні адгезивні рішення з обов'язковим врахуванням сценаріїв ремонту й end-of-life на ранніх етапах проектування.

Ключові слова: стале виробництво; циркулярний дизайн; технології з'єднання; складання; демонтажність; ремонтпридатність; екологічні клеї; життєвий цикл.

V. S. PARNENKO

PhD (Engineering), Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-1450-2744



Ye. V. KORBUT

PhD (Engineering), Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-1221-4052

ENVIRONMENTALLY ORIENTED JOINING AND ASSEMBLY TECHNOLOGIES IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE MANUFACTURING

The paper provides a review of environmentally oriented joining and assembly technologies as a crucial engineering lever for implementing sustainable manufacturing and circular design principles. It is demonstrated that decisions on the type of joints – detachable mechanical fasteners, permanent joints, hybrid solutions, and controlled-release (reversible) bonding – largely determine product repairability, the feasibility of modular component replacement, the resource efficiency of maintenance operations, and the practicality of end-of-life disassembly and material separation. From a life-cycle perspective, the study highlights how joining solutions affect the formation of “clean” material streams suitable for reuse and recycling, and why conventional permanent joints (including highly durable adhesive bonds and encapsulation/potting compounds) often become a barrier to circularity by forcing destructive disassembly, mixing materials, and reducing the value of secondary raw materials.

Particular attention is paid to current trends in “greening” adhesive technologies: reducing toxicity and emissions, avoiding hazardous constituents, lowering the energy intensity of curing processes, and developing debonding-on-demand adhesive systems that combine high in-service performance with predictable separation during repair or recycling stages. The review emphasizes that the industrial viability of such systems depends not only on adhesion strength, but also on long-term reliability, ageing resistance, process repeatability, and scalability under high-throughput manufacturing conditions. The paper discusses representative application contexts where environmental requirements strongly influence assembly choices: automotive manufacturing (modular architectures and multi-material lightweight structures), electronics (repairability and reduction of e-waste), and prosthetics/medical devices (biocompatible polymers and the need to align environmental solutions with strict human safety constraints).

As a result, the paper consolidates key criteria for selecting joining and assembly technologies in sustainable manufacturing, and identifies major knowledge gaps requiring further research. These include the lack of standardized, joint-level metrics for disassembly performance and repairability, limited availability of quantitative environmental comparison models (LCA/LCI) for alternative joining strategies, and the shortage of long-term experimental datasets addressing controlled debonding behaviour of reversible adhesive systems under real-life ageing conditions. The review concludes that the most promising direction lies in integrated strategies combining modular design, detachable joints, hybrid joining, and reversible bonding, while explicitly incorporating repair and end-of-life scenarios at early design stages.

Key words: sustainable manufacturing; circular design; joining technologies; assembly; disassembly; repairability; debonding-on-demand; green adhesives; life cycle.

Вступ

Умови сучасного промислового розвитку визначаються посиленням екологічних вимог до продукції та виробничих процесів упродовж усього життєвого циклу виробу, починаючи від вибору матеріалів і технологій складання до етапів експлуатації, ремонту, демонтажу та утилізації. У цьому контексті технології з'єднання та складання набувають ключового значення, оскільки саме вони часто визначають ремонтпридатність, можливість заміни модулів, рівень повторного використання компонентів і реальність переходу до проектування за принципами циркулярності. Традиційні підходи (нерозбірні з'єднання, клейові системи з токсичними компонентами, складні для розбирання вузли з великою кількістю різних матеріалів) нерідко ускладнюють переробку, підвищують екологічні ризики та збільшують сумарні витрати енергії й ресурсів.

Актуальність дослідження посилюється впливом міжнародних та регіональних стандартів і політик екологічного управління, які стимулюють підприємства переглядати технологічні рішення на користь екологічно орієнтованих альтернатив (зокрема впровадження систем екологічного менеджменту на засадах ISO 14001 та стратегічних орієнтирів ЄС у межах EU Green Deal) [1]. Це формує запит на технології з'єднання, що зменшують використання небезпечних речовин, підтримують розбірність і повторне використання вузлів, а також дають змогу кількісно обґрунтовувати екологічний ефект через підходи оцінювання життєвого циклу.

Практична значущість теми підтверджується прикладами галузей із високими вимогами до ефективності та якості, наприклад, автомобілебудуванням (модульне складання й швидка заміна вузлів), електронікою (ремонтпридатність і зниження електронних відходів), а також медичними технологіями та протезуванням (біосумісні полімерні матеріали й безпечні з позиції довкілля технології формування та з'єднання). Систематизація екологічно орієнтованих технологій з'єднання та складання і їхній аналіз у контексті сталого виробництва є своєчасним і необхідним кроком для підвищення конкурентоспроможності виробництв та зменшення екологічного навантаження.

Постановка проблеми

Попри зростання вимог до екологічності виробництва, у практиці проектування та виготовлення виробів технології з'єднання й складання часто обираються переважно за критеріями міцності, технологічності, вартості та продуктивності, без достатнього врахування наслідків для довкілля на етапах ремонту, модернізації, демонтажу й утилізації. У результаті виникає суперечність між потребою забезпечити надійність і довговічність виробу та необхідністю реалізувати принципи сталого виробництва і циркулярного дизайну, які передбачають зменшення токсичності матеріалів, скорочення відходів, підвищення частки повторного використання компонентів і можливість ефективного розділення матеріалів.

Проблема полягає в тому, що багато поширених рішень (нерозбірні клейові або комбіновані з'єднання, складні багатоматеріальні вузли, застосування клеїв із леткими органічними сполуками чи інших небезпечних компонентів) ускладнюють сервісне обслуговування та ремонт, роблять демонтаж енергоємним або економічно недоцільним, а також знижують якість вторинних матеріалів під час перероблення. Водночас альтернативні екологічно орієнтовані технології, такі як нетоксичні або низькоємнісінні клейові системи, розбірні та повторно збірні з'єднання, модульні конструктивні підходи, технології, сумісні з багаторазовим використанням вузлів, потребують систематизованого аналізу з позицій їхньої придатності до різних виробничих сценаріїв.

Таким чином, науково-практичне завдання полягає у визначенні та обґрунтуванні підходів до вибору технологій з'єднання і складання, які одночасно забезпечують необхідні експлуатаційні характеристики виробу та відповідають сучасним екологічним вимогам і стандартам, з урахуванням повного життєвого циклу продукції (виробництво → експлуатація → ремонт → демонтаж → повторне використання/перероблення).

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні наукові публікації у сфері сталого виробництва демонструють перехід від «локальної» оптимізації процесів з'єднання (міцність/вартість/продуктивність) до системного підходу життєвого циклу, де технології складання й демонтажу безпосередньо пов'язують із ремонтпридатністю, повторним використанням вузлів і ефективністю перероблення. Цей тренд підтримується як інженерними дослідженнями DFA/DFD (DFA (Design for Assembly) – проектування для складання, DFD (Design for Disassembly) – проектування для розбирання та демонтажу), так і нормативними змінами, що стимулюють ремонт і продовження терміну служби виробів [1].

У роботах із модульного проектування наголошується, що модульність сама по собі не гарантує циркулярності: екологічний ефект проявляється лише тоді, коли критерії складання/розбирання (DFA/DFD) інтегровані на ранніх етапах вибору архітектури виробу. Зокрема, запропоновано розширення підходів Modular Function Deployment з явним урахуванням орієнтації на складання та демонтаж як параметрів оптимізації конструкції [2].

Дослідження з роботизованого демонтажу (в т.ч. кейси щодо батарей електромобілів) показують, що складність і ризики розбирання суттєво залежать від типів з'єднань, доступності кріплень, послідовності операцій та необхідності спеціального оснащення. Це підсилює актуальність інженерних правил проектування для демонтажу як частини сталого виробництва [3].

Велика кількість робіт присвячений клеям, що забезпечують достатню міцність під час експлуатації, але можуть керовано втрачати адгезію під дією заданого стимулу (тепло/світло/механічний вплив). Це розглядається як перспективний шлях до зменшення бар'єрів демонтажу та підвищення відновлюваності компонентів. Прикладом є публікації про термо- та фотоактивовані реверсивні епоксидні системи [4], а також концепції механічно-індукованого «розклеювання» через мікрокапсули у складі адгезиву [5].

У оглядових статтях для автомобільних застосувань підкреслюється, що перехід до легких багатоматеріальних структур (алюміній – сталь – полімери – композити) ускладнює вибір технологій з'єднання та посилює роль гібридних рішень (клей + механічне кріплення) і процесів, що обмежують термічні пошкодження. Такі огляди систематизують технології, як самопробивне заклепування (self-piercing riveting), фрикційних методів зварювання тощо [6].

Європейська Директива (EU) 2024/1799 (Right to Repair) закріплює підхід, за якого ремонт і продовження ресурсу виробу розглядаються як інструмент зменшення відходів і ресурсоспоживання. У тексті прямо пов'язуються вимоги ремонтпридатності з конструктивними аспектами, зокрема здатністю до розбирання та доступністю запасних частин. Це створює зовнішній тиск на перехід від нерозбірних вузлів до рішень, сумісних із сервісом і демонтажем [1].

У оглядах з біомедичних полімерів і протезування розглядаються вимоги до біосумісності, деградації, механічних властивостей та технологічності переробки/виготовлення. Хоча екологічний аспект тут підпорядкований медичній безпеці, тренд на матеріали з контрольованими властивостями та потенційно кращими профілями безпеки/утилізації формує підґрунтя для екологізації відповідних технологій з'єднання й складання [7].

Попри активний розвиток підходів до екологічно орієнтованих технологій з'єднання та складання, аналіз сучасних досліджень вказує на наявність аспектів, що залишаються недостатньо опрацьованими або не мають усталених методик практичного впровадження. Насамперед, у багатьох роботах принципи DFA/DFD визнаються важливими, однак у реальних процедурах проектування часто бракує формалізованих алгоритмів вибору

технології з'єднання, які б одночасно враховували експлуатаційну надійність, вартість і продуктивність, а також параметри демонтажу, ремонтпридатності, можливості повторного використання вузлів і якості вторинних матеріалів. Унаслідок цього екологічні критерії нерідко залишаються етапом післяпроектної перевірки, а не рівноправним параметром оптимізації конструкції. Водночас обмежено представлені уніфіковані кількісні моделі, що дозволяли б порівнювати клейові нерозбірні, гібридні та повністю розбірні з'єднання з позицій LCA/LCI, включаючи енерговитрати, викиди, токсикологічний профіль, втрати матеріалу під час розділення, необхідність очищення й сортування, а також вплив на чистоту вторинної сировини. Наявні результати часто мають локальний характер для конкретних матеріалів або виробів і погано переносяться на інші виробничі сценарії. Окремою невирішеною проблемою є довготривала надійність керовано-роз'ємних (debonding-on-demand) клейових систем. В таких з'єднаннях є потреба поглиблення дослідження старіння з'єднань у реальних умовах (вологість, температура, циклічні навантаження), стабільності механізмів керованого роз'єднання після тривалого строку служби, ризику залишкових забруднень поверхонь та їх впливу на повторне використання деталей, а також питань масштабованості й відтворюваності процесу у промислових умовах. Недостатньо розвинутими залишаються й стандартизовані інженерні показники ремонтпридатності та демонтажності, прив'язані саме до технологій з'єднання на рівні вузла (час і кількість операцій розбирання, потреба у спеціальному інструменті, доступність зони з'єднання, ймовірність пошкодження компонентів, придатність кріплень до повторного застосування), що ускладнює порівняння альтернативних рішень і створення єдиних критеріїв для промисловості. Крім того, порівняно мало системних робіт присвячено технологічній сумісності, так званих, зелених з'єднань, із високопродуктивним масовим виробництвом, адже екологічно дружні клеї чи повністю розбірні вузли можуть вимагати додаткових операцій, змінених режимів полімеризації або підвищених вимог до підготовки поверхонь, що впливає на цикл, контроль якості та економіку процесу. Нарешті, у виробках медичного призначення та протезуванні домінують вимоги біосумісності й безпеки, тоді як питання циркулярності (демонтаж, повторне використання модулів, екологічність клейових систем і компаундів, утилізація полімерів) висвітлюються фрагментарно, що вказує на потребу в підходах, здатних поєднати медичні обмеження з екологічними вимогами без компромісу щодо безпеки для людини.

Формулювання мети дослідження

Метою цієї статті є систематизувати екологічно орієнтовані технології з'єднання та складання у контексті сталого виробництва та circular design і показати, як вибір типу з'єднання впливає на ремонтпридатність, можливість демонтажу, повторного використання вузлів і якість перероблення матеріалів протягом життєвого циклу виробу. У межах мети передбачається узагальнити сучасні підходи до, так званих, зелених клейових систем (низькотоксичних/низькоемісійних) і керовано-роз'ємних клейових з'єднань (debonding-on-demand), а також розбірних і модульних конструктивних рішень, що забезпечують відновлюваність та адаптивність виробів.

Для досягнення цієї мети стаття спрямована на виявлення прогалин у наявних дослідженнях і практиках, зокрема щодо недостатньої формалізації критеріїв вибору технологій з'єднання з урахуванням демонтажу та повторного складання, обмеженості кількісних моделей екологічної доцільності (LCA/LCI) для різних типів з'єднань, а також проблем довготривалої надійності реверсивних адгезивних систем і нестачі стандартизованих метрик ремонтпридатності на рівні вузла.

Викладення основного матеріалу дослідження

Екологічно орієнтовані технології з'єднання та складання доцільно розглядати не як набір окремих зелених рішень (наприклад, заміна клею на інший клей), а як комплекс інженерних принципів, що забезпечують екологічні переваги впродовж життєвого циклу виробу. На практиці саме з'єднання визначають, чи можна виріб розібрати без руйнування деталей, чи доступні для заміни критичні компоненти, чи реально повторно використати вузли після демонтажу і наскільки чистими залишаться матеріальні потоки для перероблення. Тому у сталому виробництві технологія з'єднання має оцінюватися одночасно за функціональними (міцність, герметичність, точність, довговічність), технологічними (швидкість операцій, автоматизація, стабільність якості, вимоги до поверхонь) та екологічними критеріями (токсичність/емісії, енергомісткість, ремонтпридатність, демонтажність, повторне використання, придатність до перероблення).

Ключовим методологічним підходом є прив'язка рішень зі складання до логіки повного життєвого циклу. У спрощеному вигляді екологічний життєвий цикл виробу з урахуванням з'єднань може бути поданий як послідовність: вибір матеріалів і типу з'єднань → складання та контроль якості → експлуатація і технічне обслуговування → ремонт/модернізація (заміна модулів) → демонтаж (роз'єднання) → сортування матеріалів і компонентів → повторне використання вузлів/перероблення → повернення матеріалів у виробництво (рис. 1). На кожному з етапів з'єднання виступає або полегшувачем циркулярності (коли доступні розбірні та повторно-збірні рішення), або блокує (коли нерозбірність призводить до руйнування деталей, змішування матеріалів і зниження цінності вторинної сировини).

З позиції конструктора й технолога екологічно орієнтовані рішення можна умовно поділити на кілька груп.



Рис. 1. Екологічний життєвий цикл виробу [8]

Перша група, це розбірні механічні з'єднання (гвинтові, замкові, байонетні, клинові, пружинні фіксатори тощо), які забезпечують можливість багаторазового розбирання, ремонту та модульної заміни вузлів. Їхня сильна сторона, це прогнозованість демонтажу та висока ремонтпридатність, а слабкими місцями може бути потенційне збільшення маси/габаритів, вища кількість деталей, ризики самовідгвинчування без належних заходів та потреба в контролі моментів затягування. До другої групи можна віднести нерозбірні з'єднання (зварювання, пайка, заклепки одноразового застосування, традиційні клеї, заливки), які часто забезпечують високу міцність і швидкість складання, але ускладнюють end-of-life процеси. Третя група, це керовано-роз'ємні або реверсивні рішення, що намагаються поєднати переваги перших двох, тобто високу експлуатаційну надійність та можливість роз'єднання за заданим сценарієм (наприклад, під час сервісу або перероблення). До них належать debonding-on-demand клейові системи, модифіковані адгезиви, технології тимчасового фіксування, а також конструктивні інженерні компроміси, коли вузол має захисний/доступний інтерфейс для розбирання.

Особливе місце займають клейові технології, оскільки вони одночасно мають значний потенціал для оптимізації маси та конструкції (особливо в багатоматеріальних виробках) і водночас створюють найбільше проблем для циркулярності. Екологічна орієнтація клейових систем включає декілька напрямів: мінімізацію токсичних компонентів і шкідливих емісій, відмову від небезпечних розчинників, оптимізацію режимів полімеризації для зниження енерговитрат, а також забезпечення чистого розділення на етапі демонтажу. У практичному вимірі це означає, що вибір клею не може обмежуватися показниками адгезійної міцності. Необхідно враховувати також поведінку з'єднання при старінні, можливість ремонту (локальне відновлення шару), сумісність із матеріалами, і що є критичним, як воно буде роз'єднуватися. Саме тому зростає інтерес до керовано-роз'ємних клейових систем, де роз'єднання може бути активоване контрольованим впливом. Для циркуляційного дизайну важливими є два критерії: по-перше, щоб роз'єднання не руйнувало деталі і не залишало залишків, які важко видалити, а по-друге, щоб процедура була технологічно реальною в сервісних і переробних умовах.

Однак у промисловості часто найкращі результати дають не чисті підходи, а гібридні з'єднання, що поєднують, наприклад, клейове з'єднання з механічним фіксатором. Така стратегія може зменшити масу та підвищити жорсткість, одночасно забезпечуючи сценарій демонтажу: механічний елемент задає напрямок/послідовність розбирання, а клейова складова забезпечує демпфування та розподіл напружень. Екологічна цінність гібридних рішень виникає тоді, коли вони проектується не лише під складання, а й під розбирання, тобто це доступність кріплень, можливість стандартного інструмента, унеможливлення пошкоджень при від'єднанні та мінімізація змішування матеріалів.

Важливим організаційним і нормативним тлом виступають системи екологічного менеджменту та політики сталого розвитку, що стимулюють підприємства формувати вимоги до технологій на рівні процесів і постачальницьких



Рис. 2. Екологічно орієнтовані рішення в процесах з'єднань та складань

ланцюгів. У реальному виборі технологій це проявляється через потребу контролю небезпечних речовин, зменшення відходів, обліку споживання енергії та документування екологічних характеристик матеріалів і процесів. У такій логіці технології складання переходять із локального рішення технолога в площину міжфункціональної оптимізації, де бере участь конструктор, технолог, еколог/фахівець із якості та підрозділ закупівель.

Розглянемо приклади, де зв'язок між екологічністю та технологіями з'єднання проявляється найбільш наочно. В автомобільній галузі актуальними є модульні підходи та можливість заміни вузлів, що скорочує час ремонту і зменшує обсяг відходів через відновлення, а не заміну всього виробу. Тут важливо, щоб модульність не була номінальною. Модулі мають бути доступними, з'єднання повинні бути розбірними у запланованій послідовності, а використані матеріали вибирається такими, щоб демонтаж не перетворювався на руйнівний процес. У разі використання багатоматеріальних структур критичною стає стратегія розділення матеріалів наприкінці життєвого циклу. Якщо з'єднання змішують потоки (наприклад, пластик + метал без можливості розділення), це знижує цінність вторинної сировини. Для сталого виробництва в автоіндустрії важливим є баланс, тобто міцність/безпека та ресурсоефективність у виробництві мають бути узгоджені з керованим демонтажем і ремонтом.

В електроніці проблема ще гостріша, оскільки пристрої часто мають високу щільність компонування, крихкі елементи та різномірні матеріали. Нерозбірні клеєні або залиті вузли ускладнюють ремонт і сприяють переходу від ремонту до заміни, що збільшує електронні відходи. Екологічно орієнтовані технології з'єднання в електроніці передбачають конструктивні рішення, які забезпечують доступ до компонентів, мінімізують руйнівні операції та спрощують заміну типових елементів (акумуляторів, дисплеїв, модулів). Технічно це означає стандартизацію кріплень, оптимізацію доступу, контроль зусиль/моментів розбирання, а також використання адгезивів і ущільнювачів, що допускають сервісне роз'єднання без пошкоджень. Саме тут реверсивні/керовано-роз'ємні клеї можуть дати відчутний ефект, якщо вони забезпечують прогнозований сценарій демонтажу і не погіршують надійність.

У протезуванні та медичних виробках екологічна орієнтація технологій з'єднання повинна бути сумісною з найжорсткішими вимогами безпеки для людини. З одного боку, зростає інтерес до біосумісних полімерів і композитів, а також до технологій, що мінімізують токсичні компоненти та ризики небезпечних виділень. А з іншого боку ці вироби часто потребують індивідуалізації, сервісного підлаштування та заміни окремих модулів (наприклад, елементів кріплення, накладок, вузлів регулювання). Відповідно, екологічно орієнтовані рішення можуть полягати в модульній архітектурі, яка дозволяє замінювати зношені частини без виготовлення нового виробу повністю, а також у виборі матеріалів і способів з'єднання, що не ускладнюють безпечну утилізацію. У цьому сегменті важливо підкреслити, що екологічність не може досягатися за рахунок біомеханічної надійності. Слід шукати рішення, які одночасно спрощують сервіс і зменшують матеріаломісткість та відходи.

Для обґрунтованого вибору технологій з'єднання в контексті сталого виробництва доцільно застосовувати узгоджену схему критеріїв (рис. 3). Практично зручно розділити їх на: експлуатаційні (міцність, довговічність, стійкість до середовища), виробничі (час циклу, автоматизація, контроль якості, потреба в підготовці поверхні, ремонтпридатність процесу), сервісні (доступність, інструментальність, повторне складання), end-of-life

(демонтажність, можливість розділення матеріалів, чистота матеріальних потоків, придатність до повторного використання вузлів) та екологічно-гігієнічні (емісії, токсичність, безпека роботи, утворення відходів). У межах цієї статті ключовим є саме взаємозв'язок сервісних і end-of-life критеріїв із технологією з'єднання: якщо виріб можна ремонтувати та розбирати без руйнування – це зазвичай зменшує сумарне ресурсоспоживання навіть тоді, коли первинне складання є трохи складнішим [3].

Таким чином можна зробити наступне узагальнення. Екологічно орієнтовані технології з'єднання та складання формують інженерну основу сталого виробництва через три взаємопов'язані механізми, якими є зменшення екологічної небезпеки матеріалів і процесів, підвищення ремонтпридатності та продовження ресурсу виробу, а також забезпечення демонтажу й розділення матеріалів для повторного використання та перероблення.

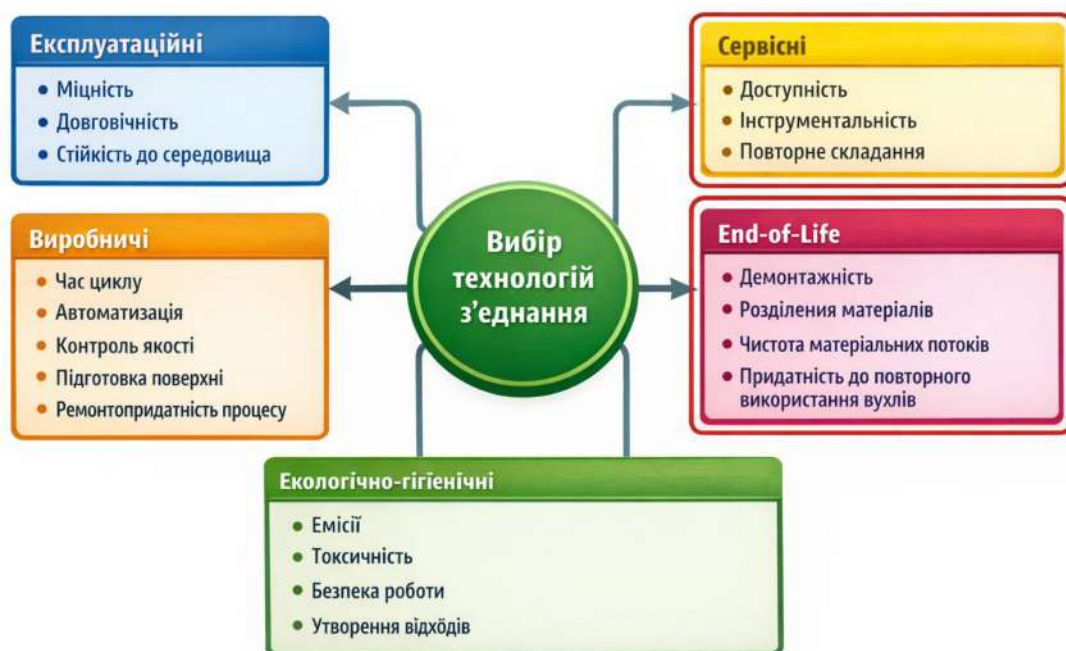


Рис. 3. Критерії вибору технологій з'єднання в контексті сталого виробництва

Найперспективнішими виглядають підходи, що поєднують модульність, розбірність, керовано-роз'ємні адгезивні технології та кількісну оцінку рішень у логіці життєвого циклу, оскільки саме вони дозволяють узгодити виробничу ефективність із вимогами циркулярної економіки.

Висновки

Екологічно орієнтовані технології з'єднання та складання є одним із визначальних чинників реалізації сталого виробництва, оскільки саме тип з'єднання значною мірою задає ремонтпридатність виробу, можливість модульної заміни компонентів, ефективність демонтажу та якість розділення матеріалів наприкінці життєвого циклу. Показано, що традиційні нерозбірні рішення (частина клейових систем, заливки, нероз'ємні комбіновані вузли) часто виступають бар'єром для circular design, оскільки ускладнюють відновлення та повторне використання вузлів і знижують цінність вторинної сировини через змішування матеріалів і забруднення поверхонь.

Узагальнення сучасних підходів дозволяє стверджувати, що найбільш перспективними є конструктивно-технологічні стратегії, які поєднують модульність, розбірність та керовано-роз'ємні (debonding-on-demand) адгезивні рішення, за умови підтвердження їх довготривалої надійності та промислової масштабованості. Обґрунтовано необхідність переходу від вибору технологій з'єднання лише за критеріями міцності й продуктивності до багато-критеріальної оцінки з урахуванням екологічних параметрів, сервісних сценаріїв і end-of-life процесів, включно з кількісними підходами LCA/LCI та метриками демонтажності/ремонтпридатності на рівні вузла.

Встановлено, що нормативні вимоги та політики сталого розвитку стимулюють перегляд технологічних рішень у галузях із високою інтенсивністю використання ресурсів та відходоутворення (автомобілебудування, електроніка), а також формують додаткові обмеження і можливості для медичних виробів та протезування, де екологічність має бути сумісною з біосумісністю та безпекою. Подальші дослідження доцільно спрямувати на формалізацію методик вибору технологій з'єднання з урахуванням демонтажу і повторного складання, розроблення стандартизованих показників ремонтпридатності/демонтажності та накопичення експериментальних даних щодо старіння і керованого роз'єднання реверсивних адгезивних систем у реальних умовах експлуатації.

Список використаної літератури

1. Directive (EU) 2024/1799 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 on common rules promoting the repair of goods and amending Regulation (EU) 2017/2394 and Directives (EU) 2019/771 and (EU) 2020/1828 (Text with EEA relevance) // Official Journal of the European Union. 2024. OJ L, 10.07.2024. Документ 32024L1799. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1799/oj1> Дата звернення: 22.12.2025.
2. Monetti F. M. Evaluating an assembly- and disassembly-oriented expansion of Modular Function Deployment through a workshop-based assessment : arXiv preprint. 2025. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2505.01762> 1 Дата звернення: 18.01.2026.
3. Rastegarpanah A., Contreras C. A., Stolkin R. Semi-autonomous Robotic Disassembly Enhanced by Mixed Reality : arXiv preprint. 2024. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://arxiv.org/pdf/2405.035301> Дата звернення: 08.01.2026.
4. Knight S. J. (Lindholm), McCoy J. D., Chowdhury S. та ін. Debonding-on-demand reversible adhesives via heat or light with competitive adhesion strength to conventional epoxy adhesives // Polymer Testing. 2025. Vol. 146. Art. 108776. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2025.108776
5. Stamp C.-H. та ін. Adhesives with Debonding-On-Demand Capability: Leveraging Responsive Microcapsules for Mechanically-Induced Debonding // Advanced Materials. 2025. Vol. 37, No. 13. Art. 2414308. DOI: 10.1002/adma.202414308
6. Lambiase F., Scipioni S. I., Lee C.-J. та ін. A State-of-the-Art Review on Advanced Joining Processes for Metal-Composite and Metal-Polymer Hybrid Structures // Materials. 2021. Vol. 14, No. 8. Art. 1890. DOI: 10.3390/ma14081890
7. Ornaghi Jr H. L., Monticeli F. M., Dall Agnol L. та ін. A Review on Polymers for Biomedical Applications on Hard and Soft Tissues and Prosthetic Limbs // Polymers (Basel). 2023. Vol. 15, No. 19. Art. 4034. DOI: 10.3390/polym15194034
8. Жива планета. United for Nature. Agenda for Ukraine: управління відходами та запровадження циркулярної економіки [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://livingplanet.org.ua/novuny/united-for-nature-agenda-for-ukraine-upravlinnya-vidkhodami-ta-zaprovadzhennya-tsirkulyarnoji-ekonomiki> Дата звернення: 12.12.2025.

References

1. The European Parliament and the Council of the European Union. (2024). Directive (EU) 2024/1799 of 13 June 2024 on common rules promoting the repair of goods and amending Regulation (EU) 2017/2394 and Directives (EU) 2019/771 and (EU) 2020/1828. *Official Journal of the European Union*, L.
2. Monetti, F. M. (2025). *Evaluating an assembly- and disassembly-oriented expansion of Modular Function Deployment through a workshop-based assessment* (arXiv:2505.01762). arXiv.
3. Rastegarpanah, A., Contreras, C. A., & Stolkin, R. (2024). *Semi-autonomous robotic disassembly enhanced by mixed reality* (arXiv:2405.03530). arXiv. ()
4. Knight, S. J. (Lindholm), McCoy, J. D., Chowdhury, S., & Lee, Y. (2025). Debonding-on-demand reversible adhesives via heat or light with competitive adhesion strength to conventional epoxy adhesives. *Polymer Testing*, 146, 108776. doi:10.1016/j.polymertesting.2025.108776
5. Stamp, C.-H., Stumpp, J., & Calvino, C. (2025). Adhesives with debonding-on-demand capability: Leveraging responsive microcapsules for mechanically-induced debonding. *Advanced Materials*, 37(13), 2414308. <https://doi.org/10.1002/adma.202414308>
6. Lambiase, F., Scipioni, S. I., Lee, C.-J., Ko, D.-C., & Liu, F. (2021). A state-of-the-art review on advanced joining processes for metal-composite and metal-polymer hybrid structures. *Materials*, 14(8), 1890. doi:10.3390/ma14081890
7. Ornaghi Jr, H. L., Monticeli, F. M., & Dall Agnol, L. (2023). A review on polymers for biomedical applications on hard and soft tissues and prosthetic limbs. *Polymers*, 15(19), 4034. doi:10.3390/polym15194034 ()
8. Living Planet (2024, February 1). United for Nature. Agenda for Ukraine. Retrieved (12.12.2025), from <https://livingplanet.org.ua/novuny/united-for-nature-agenda-for-ukraine-upravlinnya-vidkhodami-ta-zaprovadzhennya-tsirkulyarnoji-ekonomiki>

Дата першого надходження статті до видання: 18.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

С. А. РУСАНОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-1003-4867

В. О. ПРОЦЕНКО

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-3468-4952

О. І. КЛЮЄВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-6803-0706

І. А. ШАТОХІНА

старший викладач кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-5767-3674

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛООБМІНУ СПІРАЛЬНО-КАПСУЛЬНОГО ТЕПЛОАКУМУЛЯТОРУ ДЛЯ ТЕПЛОВОЇ ПІДГОТОВКИ АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ЗАСОБАМИ CAE-СИСТЕМ

У роботі наведено результати чисельного моделювання гідродинамічних та теплообмінних процесів, що відбуваються у спірально-капсульному теплоаккумуляторі, призначеному для теплової підготовки автомобільних двигунів внутрішнього згоряння. Метою дослідження є аналіз характеру руху теплоносія у спіральних каналах теплоаккумулятора, визначення просторової нерівномірності температурного поля, визначення часу фазового переходу а також оцінювання ефективності тепловіддачі від акумулюючого матеріалу до робочої рідини.

Чисельні розрахунки виконано з використанням методів обчислювальної гідродинаміки (CAE/CFD) на основі методу скінченних об'ємів. Для опису турбулентних режимів течії теплоносія застосовано $k-\epsilon$ модель турбулентності, що забезпечує прийнятний компроміс між точністю розрахунків і обчислювальними витратами. Моделювання враховує складну геометрію спірально-капсульної структури теплоаккумулятора, умови теплообміну між теплоносієм, корпусом та акумулюючим середовищем, фазовий перехід в теплоакуюлюючому матеріалі, а також граничні умови циркуляції під час режиму тепловіддачі.

За результатами розрахунків встановлено час фазового переходу, теплове навантаження, наявність зон нерівномірного розподілу швидкостей та температури. Виявлено, що нерівномірність прогріву окремих капсульних елементів може досягати 15–25 °C, що суттєво впливає на ефективність використання накопиченої теплової енергії.

Проведене дослідження підтверджує доцільність застосування CAE/CFD-моделювання як ефективного інструменту для аналізу та оптимізації конструкції теплоаккумуляторів різних типів. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення геометрії каналів, підвищення рівномірності тепловіддачі та скорочення часу теплової підготовки двигуна внутрішнього згоряння, а також для подальшої розробки інтегрованих моделей систем накопичення та використання теплової енергії у транспортних засобах.

Ключові слова: передпусковий підігрів, чисельне моделювання, гідродинаміка, теплообмін, чисельні методи, системи автоматизованого моделювання.



S. A. RUSANOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Systems
and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-1003-4867

V. O. PROTSENKO

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Transport Systems
and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-3468-4952

O. I. KLIUIEV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Systems
and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-6803-0706

I. A. SHATOKHINA

Senior Lecturer at the Department of Transport Systems
and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-5767-3674

MODELING OF HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER IN A SPIRAL-CAPSULE THERMAL ENERGY STORAGE UNIT FOR THERMAL PREPARATION OF AUTOMOTIVE INTERNAL COMBUSTION ENGINES USING CAE SYSTEMS

The paper presents the results of numerical modeling of hydrodynamic and heat transfer processes occurring in a spiral-capsule thermal energy storage unit designed for the thermal preparation of automotive internal combustion engines. The aim of the study is to analyze the coolant flow behavior in the spiral channels of the thermal accumulator, determine the spatial non-uniformity of the temperature field, evaluate the duration of the phase change process, and assess the efficiency of heat transfer from the heat-accumulating material to the working fluid.

The numerical simulations were performed using computational fluid dynamics (CAE/CFD) methods based on the finite volume approach. Turbulent flow regimes of the coolant were described using the k - ϵ turbulence model, which provides a reasonable balance between computational accuracy and computational cost. The model accounts for the complex geometry of the spiral-capsule structure, heat exchange conditions between the coolant, the accumulator core, and the heat-storage medium, the phase change process within the heat-accumulating material, as well as the boundary conditions corresponding to the heat-release operating mode.

The simulation results allowed determination of the phase change duration, thermal load, and identification of zones with non-uniform distributions of velocity and temperature. It was found that temperature differences between individual capsule elements may reach 15–25 °C, which significantly affects the efficiency of utilization of the stored thermal energy.

The conducted study confirms the feasibility of applying CAE/CFD modeling as an effective tool for the analysis and optimization of thermal energy storage devices of various designs. The obtained results can be used to improve channel geometry, enhance the uniformity of heat release, and reduce the time required for thermal preparation of internal combustion engines, as well as to support further development of integrated models of thermal energy storage and utilization systems in vehicles.

Key words: pre-start heating, numerical simulation, hydrodynamics, heat transfer, numerical methods, computer-aided modeling systems.

Постановка проблеми

Формування раціонального теплового стану автомобільного двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) при передпусковій підготовці є однією із важливих задач. Підтримання оптимального температурного режиму роботи силового агрегату при пуску безпосередньо впливає на його паливну економічність, рівень шкідливих викидів, надійність та експлуатаційний ресурс. Відхилення температури основних елементів двигуна від оптимальних значень на етапі пуску та прогрівання двигуна, зокрема в умовах низьких температур навколишнього середовища, призводить до погіршення умов згоряння палива, зростання механічних втрат і зниження загальної ефективності роботи транспортного засобу.

Передпускова теплова підготовка є критично важливою як для автомобілів промислового призначення, так і для сучасних гібридних транспортних засобів, у яких двигун внутрішнього згоряння часто працює в режимі багаторазових зупинок і повторних пусків. Запуск холодного двигуна супроводжується підвищенням зношування його елементів, збільшенням споживаного пускового струму, погіршенням динамічних та комфортних характеристик автомобіля, а також зростанням витрат пального й токсичності відпрацьованих газів.

Негативні наслідки холодного пуску зумовлені, зокрема, низькою температурою поверхонь камери згоряння, що ускладнює процеси сумішоутворення та займання. Частина палива надходить у циліндри у рідкому стані, не встигає повністю випаровуватися та згоряти, що призводить до зниження ефективності згоряння і підвищення викидів шкідливих речовин. Використання систем нейтралізації відпрацьованих газів не забезпечує повного вирішення проблеми, оскільки каталізatori також потребують досягнення робочої температури. У міських умовах експлуатації, що характеризуються короткими поїздками, частими зупинками та повторними пусками двигуна, зазначені недоліки проявляються особливо інтенсивно.

Передпускові системи теплової підготовки можуть реалізовуватися у вигляді електричних підігрівачів, що живляться від зовнішньої мережі або бортової електросистеми, автономних підігрівачів на рідкому паливі, а також теплових акумуляторів, які накопичують теплову енергію під час роботи двигуна і використовують її перед наступним пуском. Серед зазначених рішень теплові акумулятори є перспективним напрямом, оскільки дозволяють ефективно використовувати вторинне тепло без додаткових витрат пального чи електроенергії.

Ефективність теплового акумулятора значною мірою визначається особливостями його внутрішньої конструкції, характером руху теплоносія та інтенсивністю теплообміну між акумулюючим середовищем і робочою рідиною. У цьому контексті особливий інтерес становлять спіральні-капсульні тепло акумулятори з фазовим переходом, які забезпечують компактність, розвинену поверхню теплообміну та можливість інтенсифікації теплопередачі. Дослідження гідродинаміки та теплообміну в таких пристроях із застосуванням сучасних CAE-методів є необхідною умовою для їх оптимізації та підвищення ефективності передпускової теплової підготовки автомобільних двигунів внутрішнього згоряння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У наукових публікаціях [1–3] висвітлено загальні підходи та принципи реалізації передпускової теплової підготовки ДВЗ. Питання створення та експериментального дослідження комбінованих систем підігріву двигунів і транспортних засобів, розглянуто в роботах [4, 5]. Аналіз екологічних переваг і обмежень застосування теплоакумуляційних технологій у транспорті наведено в джерелах [6]. Вказані системи достатньо актуальні для гібридних автомобілів. Наприклад, дизельні двигуни сімейства TDI з робочим об'ємом 1,6 та 2,0 л, які застосовуються на значній кількості моделей автомобілів марок Volkswagen і Audi, оснащені розвиненою системою керування тепловим режимом. Дана система спрямована на прискорення виходу двигуна на робочу температуру після холодного запуску, а також на раціональне використання теплової енергії, що виділяється в процесі роботи двигуна, з метою підвищення ефективності згоряння паливної суміші. Подача охолоджувальної рідини до окремих контурів системи охолодження здійснюється за допомогою трьох незалежних насосів, робота яких регулюється відповідно до поточного режиму навантаження двигуна. Особливості використання систем накопичення тепла в гібридних автомобілях, зокрема систем збереження теплоти охолоджувальної рідини (Coolant Heat Storage System, CHSS), досліджено в роботі [7].

Конструктивні рішення сучасних систем теплової підготовки, включно з різними варіантами теплоакумуляторів, описані в публікаціях [8] та у низці патентних матеріалів [9–11]. Разом із тим аналіз доступних джерел свідчить, що питання внутрішньої гідродинаміки теплоносія та просторової нерівномірності температурних полів як у системах теплопідготовки загалом, так і безпосередньо в теплоакумуляторах, зокрема спіральні-капсульного типу, залишаються недостатньо дослідженими. Серед небагатьох робіт, у яких порушується проблема температурної неоднорідності під час теплової підготовки двигуна, можна відзначити публікації [12]. Саме наявність цього наукового пробілу визначає мету та завдання даного дослідження.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є чисельний аналіз процесів тепловіддачі та просторової неоднорідності температурного поля під час роботи теплоакумулятора фазового переходу спіральні-капсульного типу авторської конструкції з визначенням часу фазового переходу. Дослідження виконується для заданого режиму роботи та визначеної схеми циркуляції підігрітої охолоджувальної рідини з використанням методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) з врахуванням фазового переходу.

Викладення основного матеріалу дослідження

В якості модельного обладнання було обрано спіральні-капсульний теплоакумулюючий апарат авторської конструкції (рис. 1, теплоізоляція не показана). Як заготовки для виготовлення капсульних елементів було використано безшовні алюмінієві труби з діаметром 22 мм та товщиною стінки 1,25 мм. Зазначені геометричні параметри обрано як компромісне рішення, що забезпечує достатньо розвинену площу теплообміну між охолоджувальною рідиною та поверхнею капсул за умови збереження прийнятної технологічної складності їх виготовлення.

Внутрішній об'єм капсул заповнювався розплавленим теплоакумуючим матеріалом – октагідратом гідроксиду барію з температурою фазового переходу 78 °С, при цьому у верхній частині повинен залишатися технологічний зазор, необхідний для компенсації теплового розширення речовини під час плавлення.

На відміну від безпосередньо капсульного теплоаккумулятору [12], для фіксації та впорядкування просторового розташування капсул усередині корпусу теплоаккумулятору були спроектовані металеві напрямні спіралі. Запропонована конструктивна схема дозволяє поділити внутрішній об'єм теплоаккумулятору на окремі напрямні секції та суттєво збільшити довжину шляху руху теплоносія в межах пристрою, що сприяє більш повному відбору теплової енергії за один цикл циркуляції, при цьому спіральний рух з тангенціальним підключенням патрубків зменшує гідравлічний опір теплообмінника. Теплоаккумулятор покривається шаром теплоізоляції (не показано на рисунках).

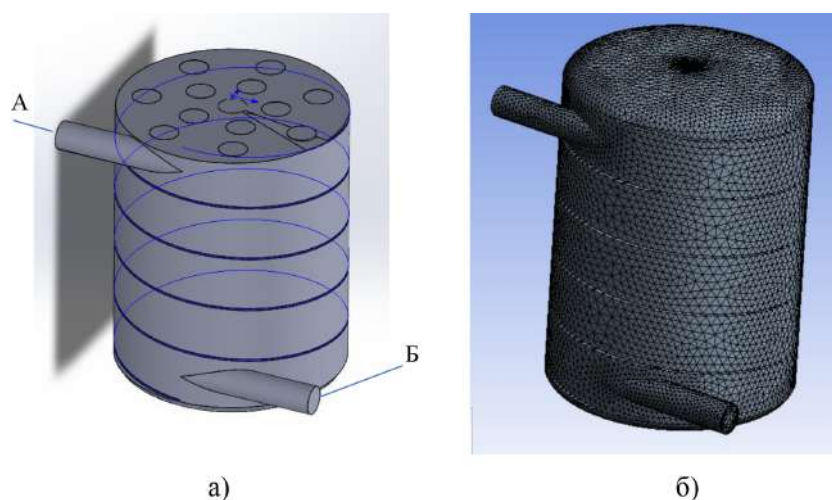


Рис. 1. CAD-модель ТА (а) з вказаними патрубками подачі рідини (А) та виводу (Б) та сітка скінченних об'ємів (б)

Доцільність застосування CFD-моделювання у дослідженні процесів теплової підготовки двигунів внутрішнього згоряння з використанням спірально-капсульних теплоаккумуляторів зумовлена складним характером гідродинамічних і теплотехнічних явищ, що відбуваються всередині теплоаккумуляційного пристрою. Експериментальні методи дослідження в таких умовах не завжди забезпечують достатню просторову роздільну здатність для достовірного визначення температурних полів та характеристик потоку, особливо на початкових стадіях відбору накопиченого тепла.

Застосування методів обчислювальної гідродинаміки дозволяє детально відтворити структуру руху теплоносія у спіральних і лабіринтних каналах теплоаккумулятора, кількісно оцінити локальні градієнти температури та швидкості, а також ідентифікувати зони з пониженою інтенсивністю теплообміну. Такий підхід забезпечує поглиблений аналіз процесів тепловіддачі від акумулюючого матеріалу до охолоджувальної рідини та створює підґрунтя для обґрунтованої оцінки ефективності конструкції теплоаккумулятора, вибору раціональної схеми циркуляції теплоносія і коригування параметрів теплоаккумуляційної системи з метою підвищення ефективності передпускової теплової підготовки двигуна.

Модельна задача полягала в аналізі теплообміну в апараті з врахуванням фазового переходу від його початку для рідини, що поступає в теплоаккумулятор з вхідною температурою 5 °С та витратою $0,145 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ (що забезпечується зовнішньою помпою) в нестационарній постановці.

Фазовий перехід враховувався у відповідності з методом ефективної теплоємності [12] без явного виділення положення границь фазового переходу, з розрахунком конвективного теплопереносу в розплаві:

$$c_{\text{еф}} \rho \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + \mathbf{v} \nabla T \right) = \nabla (\lambda_{\text{еф}} \nabla T) + q, \quad (1)$$

де $c_{\text{еф}}$, $\lambda_{\text{еф}}$ – ефективні значення теплоємності й теплопровідності, які враховують теплоту плавлення в задачі Стефана [12] і наявність конвективного теплопереносу, $\mathbf{v}$ – поле швидкостей (конвективні струми), q – потужність внутрішніх джерел тепла, при їхній наявності. Для опису процесу фазового переходу використовується підхід ефективної теплоємності, у межах якого теплоємнісна характеристика матеріалу доповнюється δ -подібною складовою та подається у відповідному аналітичному вигляді

$$c_{\text{еф}} = c(T) + q_n \delta(T - T^*), \quad (2)$$

де T^* – температура фазового переходу.

Під час чисельної реалізації в межах скінченного температурного інтервалу ΔT , що відповідає зоні фазового переходу, другий доданок доцільно апроксимувати відношенням питомої теплоти фазового переходу до ширини цього інтервалу температур $q_n/\Delta T$. Для модельної задачі $\Delta T = 2^\circ\text{C}$, $q_n = 240 \text{ кДж/кг}$.

Вибір адекватної моделі турбулентності є важливим етапом постановки чисельної задачі. Для дослідження теплогідродинамічних процесів у системі охолодження під час передпускової теплової підготовки двигуна застосовано модель турбулентності $k-\epsilon$. Дана модель дозволяє з достатньою точністю описувати розподіли швидкостей і температури при відносно невеликих обчислювальних витратах, що є особливо доцільним у межах параметричних і порівняльних досліджень.

Модель $k-\epsilon$ добре відповідає умовам течії в замкнених каналах системи охолодження, для яких характерний квазіусталений режим руху теплоносія. Її використання забезпечує коректне відтворення узагальненої структури потоку та температурного поля. При цьому виконано контроль значень безрозмірного параметра y^+ у приповерхневих зонах з метою дотримання коректних умов застосування обраної турбулентної моделі.

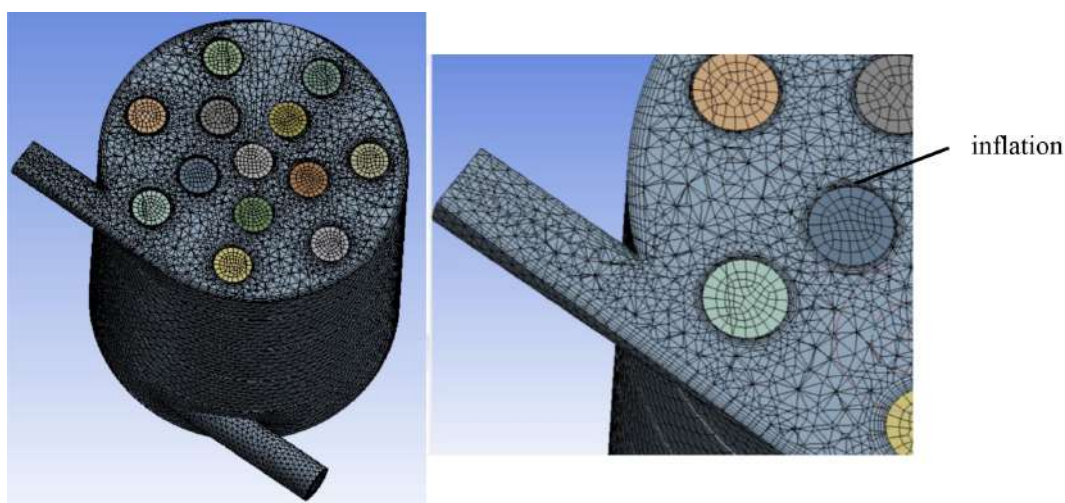


Рис. 2. Сітка скінченних об'ємів з шаром (inflation) призматичних комірок

Для розв'язання гідродинамічної частини задачі граничні умови задавалися у вигляді вхідної швидкості, визначеної на основі заданої витрати теплоносія, а для зливного каналу використовувалася умова типу Outlet. У тепловій постановці на вході потоку була задана температура охолоджувальної рідини, що становить 5°C . Для коректного опису теплообміну між окремими областями моделі застосовано різні типи інтерфейсів: на межі контакту твердого тіла з рідиною використано умову Conservative Interface Flux, для сполучення рідинних областей задано інтерфейс типу General Connection, тоді як для зовнішніх поверхонь твердих доменів встановлено граничну умову тепловіддачі.

За результатами розрахунків було отримано температурні карти фреймів нестационарної задачі для 120 с прогріву. Температурні карти та лінії току показані на рис. 3.

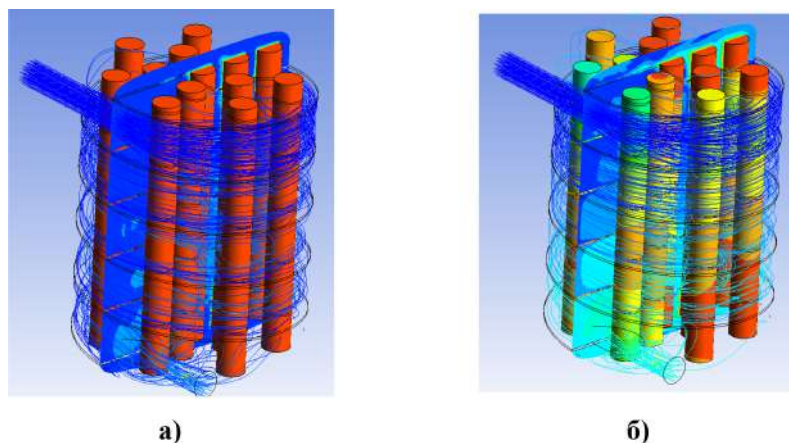


Рис. 3. Карта поля температур та лінії току на початкових кроках за часом (а) та на проміжних кроках (б)

На рис. 4 (а) показано графік температур всередині однієї з капсул у часі. На рис. 4 (б) показано графік температур у часі рідини для вихідного патрубку. З рис. 4 (а) бачимо, що час фазового переходу становить близько 57 с, після чого йде подальша швидка розрядка теплоаккумулятора. Починаючи з 20-ї секунди роботи (рис. 4, б) тепловий перепад між входом та виходом становить не менш, ніж $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, досягаючи пікового значення в $31 - 5 = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ близько 70-ї секунди роботи.

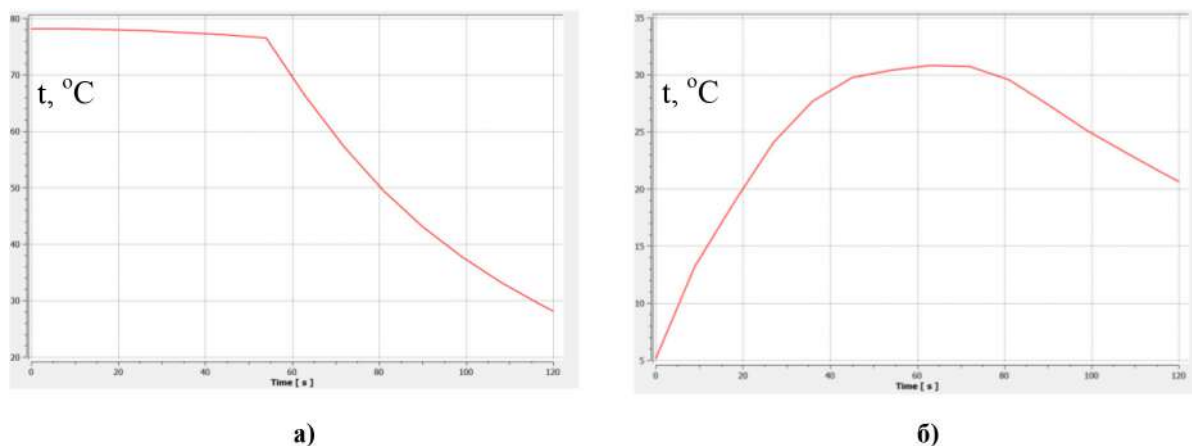


Рис. 4. Графік температур всередині капсули у часі (а) та графік температур у часі рідини для вихідного патрубка (б)

Розраховані поля швидкостей теплоносія та відповідні лінії току, представлені на рис. 3, дозволяють проаналізувати як загальну ефективність тепловіддачі у спірально-капсульному теплоаккумуляторі, так і локальні особливості процесів теплообміну між охолоджувальною рідиною та капсульними елементами. Отримані результати є інформативними для оцінювання рівномірності відбору накопиченої теплової енергії в межах усього об'єму теплоаккумулятора.

Аналіз розподілу швидкостей показує, що рух теплоносія в каналах між капсулами має просторово неоднорідний характер. Найбільш характерною особливістю є формування зон з пониженою швидкістю течії у ділянках під кришкою та днищем. У зазначених областях інтенсивність конвективного теплообміну знижується, що призводить до менш ефективного відбору тепла від теплоакуючого матеріалу та формування нерівномірного температурного поля, що підтверджується відповідними картами розподілу температури. Ці місця доречно узгоджувати з величиною технологічних зазорів, необхідних для компенсації теплового розширення речовини під час плавлення.

Додатково встановлено, що в межах спірально-капсульного теплоаккумулятора спостерігається суттєва неоднорідність температури капсульних елементів: різниця між найбільш нагрітими та найменш прогрітими зонами може досягати близько $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. У окремих ділянках поверхонь капсул та прилеглих каналів ця різниця зростає до $30\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такий характер температурного розподілу є важливим з точки зору термічних напружень і може впливати на ефективність тепловіддачі та довговічність теплоаккумулятора в умовах циклічної експлуатації.

Загальний гідравлічний опір тепло аккумулятору становить $\approx 100\text{ Па}$. Вказані гідравлічні втрати дуже незначні у порівнянні з втратами на подолання опору патрубків та трубопроводів зовнішньої системи теплопідготовки та каналів двигуна, тому можуть бути знехтувані при загальному гідравлічному розрахунку помпи.

Висновки

Виконане чисельне моделювання підтверджує високу інформативність CFD-аналізу для дослідження гідродинамічних і теплотехнічних процесів, що відбуваються у спірально-капсульному теплоаккумуляторі, призначеному для теплової підготовки автомобільних двигунів внутрішнього згоряння. Отримано детальні дані щодо розподілу швидкостей і температури теплоносія в каналах теплоаккумулятора, що дозволило комплексно оцінити ефективність відбору накопиченої теплової енергії та рівномірність прогріву капсульних елементів.

Встановлено час фазового переходу теплоакуючого матеріалу. Знайдено теплове навантаження між входом та виходом не становить менш, ніж $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, досягаючи пікового значення в $26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результати розрахунків показали, що рух охолоджувальної рідини в умовах складної спірально-лабіринтної геометрії супроводжується формуванням зон з пониженою швидкістю потоку, особливо у ділянках під кришкою та днищем. Наявність таких зон призводить до локального зниження інтенсивності теплообміну та формування помітних температурних градієнтів у теплоакуючому матеріалі та елементах конструкції теплоаккумулятора. Виявлена нерівномірність теплового поля свідчить про необхідність обґрунтованого вибору геометрії каналу, конфігурації капсул і параметрів циркуляції теплоносія з метою підвищення ефективності тепловіддачі.

Проведений аналіз підтверджує, що CFD-розрахунки є обов'язковим етапом комплексного проектування та оптимізації систем теплової підготовки двигунів із використанням теплоаккумуляційних пристроїв. Чисельне моделювання забезпечує не лише кількісну оцінку теплових і гідравлічних характеристик теплоаккумулятора, але й дозволяє здійснювати інженерну перевірку доцільності застосування різних схем циркуляції, конструктивних рішень і типів теплоакumuлюючих елементів. Такий підхід формує науково обґрунтовану основу для підвищення енергоефективності систем теплопідготовки, скорочення часу теплової підготовки та подальшої розробки інтегрованих моделей повного циклу роботи теплоаккумуляційних систем – від накопичення теплоти до її передачі у ключові зони двигуна під час запуску.

Список використаної літератури

1. Gabriel A. Study on the Possibility of Facilitating Internal Combustion Engine Starting at Very Low Temperatures// *SAE Technical Paper* 920038. 1992. DOI: 10.4271/920038
2. Kim D. S., Park Y. J., Lee S. W. et al. A study on characteristics and control strategies of cold start operation for improvement of harmful exhaust emissions in SI engines// *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2008. Vol. 22. P. 141–147. DOI: 10.1007/s12206-007-1017-6
3. Anghelache G., Boriaru N. General Preheating System for Cold Starting of Internal Combustion Engine// *SAE Technical Paper* 940107. 1994. DOI: 10.4271/940107
4. Gritsuk I. V. The Development and the Study of the Combined Heating System of Engines and Vehicles// *The Herald of Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2015. Vol. 70. P. 23–32.
5. Gritsuk I., Volkov V., Gutarevych Y., Mateichyk V., Verbovskiy V. Improving engine pre-start and after-start heating by using the combined heating system // *SAE Technical Paper* 2016-01-8071. 2016. DOI: 10.4271/2016-01-8071
6. Klets D., Gritsuk I., Makovetskyi A., Bulgakov N. et al. Information Security Risk Management of Vehicles// *SAE Technical Paper* 2018-01-0015. 2018. DOI: 10.4271/2018-01-0015
7. Волков В. П., Грицук І. В., Володарець М. В., Погорлецький Д. С., Симоненко Р. В. Особливості дослідження теплоенергетичних характеристик теплоакumuлюючого матеріалу для здійснення комбінованого прогріву гібридного транспортного засобу// *Наукові нотатки*. 2019. Вип. 65. С. 39–46. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2019_65_8
8. Ключев О.І., Русанов С.А., Шатохіна І.А. Нові конструкції теплових акумуляторів для передпускової підготовки двигунів внутрішнього згоряння автомобілів// *Вісник ХНТУ*. 2024. № 1(88). С. 41–48.
9. Ключев О. І., Русанов С. А., Аппазов Е. С., Луняка К. В., Коновалов Д. В., Мацків Б. В. Тепловий акумулятор системи передпускового прогріву двигуна внутрішнього згоряння: пат. на корисну модель № 137780 Україна: МПК F02N 15/00, F24H 7/00. – Заявл. 03.04.2019; опубл. 11.11.2019, Бюл. № 21.
10. The system of coolant optimal temperatures in ICE: пат. 103729 Україна: МПК (2013.01) F01P 3/22, B60H 1/04, B60K 11/00 / Гутаревич Ю. Ф., Матейчик В. П., Грицук І. В., Волков В. П., Каграманян А. О., Комов П. Б., Комов О. Б., Поддубняк В. Ю., Сергієнко М. І., Краснокуцька З. І.; заявник і патентовласник Національний транспортний університет. № ua 103729; заявл. 30.10.2012; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7. 17 с. : іл.
11. Луняка К. В., Ключев О. І., Русанов С. А., Ключева О. О., Коновалов Д. В. Тепловий акумулятор для передпускового прогріву двигуна внутрішнього згоряння: пат. на корисну модель № 149067 Україна: МПК F02N 15/00, F24H 7/00. Заявл. 26.05.2021; опубл. 13.10.2021, Бюл. № 41.
12. Дмитрієв Д. О., Аппазов Е. С., Русанов С. А., Ключев О. І. Моделювання процесу розігріву двигуна з тепловим акумулятором при передпусковій підготовці// *Вісник Хмельницького національного університету*. 2015. № 5. С. 54–58.

References

1. Gabriel, A. (1992). Study on the possibility of facilitating internal combustion engine starting at very low temperatures. *SAE Technical Paper* 920038. <https://doi.org/10.4271/920038>
2. Kim, D. S., Park, Y. J., Lee, S. W., et al. (2008). A study on characteristics and control strategies of cold start operation for improvement of harmful exhaust emissions in SI engines. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22, 141–147. <https://doi.org/10.1007/s12206-007-1017-6>
3. Anghelache, G., & Boriaru, N. (1994). General preheating system for cold starting of internal combustion engine. *SAE Technical Paper* 940107. <https://doi.org/10.4271/940107>
4. Gritsuk, I. V. (2015). The development and the study of the combined heating system of engines and vehicles. *The Herald of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 70, 23–32.
5. Gritsuk, I., Volkov, V., Gutarevych, Y., Mateichyk, V., & Verbovskiy, V. (2016). Improving engine pre-start and after-start heating by using the combined heating system. *SAE Technical Paper* 2016-01-8071. <https://doi.org/10.4271/2016-01-8071>

6. Klets, D., Gritsuk, I., Makovetskyi, A., Bulgakov, N., et al. (2018). Information security risk management of vehicles. *SAE Technical Paper 2018-01-0015*. <https://doi.org/10.4271/2018-01-0015>
7. Volkov, V. P., Hrytsuk, I. V., Volodarets, M. V., Pohorletskyi, D. S., & Symonenko, R. V. (2019). Osoblyvosti doslidzhennia teploenerhetychnykh kharakterystyk teploakumuliuiuchoho materialu dlia zdiisnennia kombinovanoho prohrivu hibrydnogo transportnoho zasobu [Features of studying the thermal-energy characteristics of heat-accumulating material for combined heating of a hybrid vehicle]. *Naukovi Notatky*, 65, 39–46. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2019_65_8
8. Kliuiev, O. I., Rusanov, S. A., & Shatokhina, I. A. (2024). Novi konstruktsii teplovykh akumulatoriv dlia peredpuskovoi pidhotovky dvyhunyv vnutrishnoho zghoriannia avtomobiliv [New designs of thermal accumulators for pre-start preparation of internal combustion engines of vehicles]. *Visnyk KhNTU*, 1(88), 41–48.
9. Kliuiev, O. I., Rusanov, S. A., Appazov, E. S., Luniaka, K. V., Konovalov, D. V., & Matskiv, B. V. (2019). *Teplovyi akumulator systemy peredpuskovoho prohrivu dvyhuna vnutrishnoho zghoriannia* [Thermal accumulator of the pre-start heating system of an internal combustion engine] (Utility Model Patent No. UA 137780). Filed April 3, 2019. Published November 11, 2019, Bulletin No. 21.
10. Hutariievych, Yu. F., Mateichyk, V. P., Hrytsuk, I. V., Volkov, V. P., Kagramanian, A. O., Komov, P. B., Komov, O. B., Poddubniak, V. Yu., Serhiienko, M. I., & Krasnokutska, Z. I. (2013). *The system of coolant optimal temperatures in ICE* (Patent No. UA 103729). National Transport University. Filed October 30, 2012. Published April 10, 2013, Bulletin No. 7.
11. Luniaka, K. V., Kliuiev, O. I., Rusanov, S. A., Kliuieva, O. O., & Konovalov, D. V. (2021). *Teplovyi akumulator dlia peredpuskovoho prohrivu dvyhuna vnutrishnoho zghoriannia* [Thermal accumulator for pre-start heating of an internal combustion engine] (Utility Model Patent No. UA 149067). Filed May 26, 2021. Published October 13, 2021, Bulletin No. 41.
12. Dmytriiev, D. O., Appazov, E. S., Rusanov, S. A., & Kliuiev, O. I. (2015). Modeliuvannia protsesu rozihrovu dvyhuna z teplovym akumulatorom pry peredpuskovii pidhotovtsi [Modeling the process of engine heating with a thermal accumulator during pre-start preparation]. *Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnoho Universytetu*, 5, 54–58.

Дата першого надходження статті до видання: 10.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

А. П. СЛЮСАР

аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0005-1960-7851

І. Ш. НЕВЛЮДОВ

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0002-9837-2309

С. В. ХРУСТАЛЬОВА

кандидат технічних наук, доцент
доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0003-3363-4547

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ДЕФЕКТІВ КОНВЕЄРНИХ СТРІЧОК НА ОСНОВІ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ АЛГОРИТМІВ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

У статті розглянуто актуальну науково-прикладну проблему забезпечення надійності стрічкових конвеєрів шляхом впровадження інтелектуальної автоматизованої системи моніторингу дефектів конвеєрних стрічок на промислових підприємствах. Стрічкові конвеєри є критичними елементами технологічних процесів у гірничодобувній, металургійній, цементній, харчовій та багатьох інших галузях, і від їх безперервної роботи залежить функціонування цілих виробничих ліній. Водночас, традиційні методи діагностики стрічок – переважно візуальні огляди персоналом – мають суттєві обмеження, пов'язані з людським фактором, необхідністю зупинки обладнання та неможливістю забезпечити цілодобовий контроль.

Метою дослідження є розроблення та експериментальне обґрунтування ефективності системи комп'ютерного зору для автоматизованого виявлення дефектів стрічки в умовах реального виробництва. Запропоновано комплексну архітектуру системи діагностики, що включає три рівні: модуль класифікації загального стану стрічки (на основі ResNet-18), модуль детекції типових дефектів (Fast R-CNN), а також модуль сегментації пошкоджень для точного виділення контурів та оцінки площі дефектів (Mask R-CNN). Навчання моделей здійснювалося на базі експериментального набору зображень, зібраного з відеопотоку промислової камери.

Отримані результати свідчать про високу точність розпізнавання несправностей і можливість адаптації системи до умов українських підприємств. Модель класифікації демонструє похибку менше 7 %, а детектор і сегментатор забезпечують якісне виявлення та локалізацію дефектів. Показано, що застосування запропонованої системи дозволяє переходити від реактивного технічного обслуговування до предиктивного (прогнозного), мінімізуючи аварії та витрати на ремонт. У перспективі розглядається інтеграція системи з платформами MES/ERP для формування повноцінного цифрового контуру управління технічним станом обладнання у відповідності до концепції Industry 4.0.

Ключові слова: комп'ютерний зір, стрічковий конвеєр, дефекти стрічки, нейромережеві алгоритми, ResNet-18, Fast R-CNN, Mask R-CNN, автоматизована діагностика, сегментація, промислова безпека.

A. P. SLIUSAR

Postgraduate Student at the Department of Computer-Integrated Technologies,
Automation, Robotics and Security Engineering
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0005-1960-7851



I. SH. NEVLIUDOV

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Computer-Integrated Technologies,
Automation, Robotics and Security Engineering
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0002-9837-2309

S. V. KHRUSTALOVA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Computer-Integrated Technologies,
Automation, Robotics and Security Engineering
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0003-3363-4547

INTELLIGENT AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING DEFECTS IN CONVEYOR BELTS BASED ON NEURAL NETWORK ALGORITHMS OF COMPUTER VISION

The article addresses a relevant scientific and applied problem of ensuring the reliability of belt conveyors through the implementation of an intelligent automated system for monitoring conveyor belt defects at industrial enterprises. Belt conveyors are critical components of technological processes in the mining, metallurgical, cement, food, and many other industries, and the functioning of entire production lines depends on their continuous operation. At the same time, traditional belt diagnostic methods – primarily visual inspections performed by personnel – have significant limitations associated with the human factor, the need to stop equipment, and the inability to provide continuous monitoring.

The aim of this study is to develop and experimentally substantiate the effectiveness of a computer vision system for automated belt defect detection under real production conditions. A comprehensive diagnostic system architecture is proposed, consisting of three levels: a general belt condition classification module (based on ResNet-18), a typical defect detection module (Fast R-CNN), and a damage segmentation module for precise contour extraction and defect area estimation (Mask R-CNN). The models were trained using an experimental image dataset collected from the video stream of an industrial camera.

The obtained results demonstrate high fault recognition accuracy and the feasibility of adapting the system to the conditions of Ukrainian enterprises. The classification model shows an error rate below 7 %, while the detector and segmenter provide high-quality defect identification and localization. It is shown that the application of the proposed system enables the transition from reactive maintenance to predictive maintenance, minimizing failures and repair costs. Future work considers integrating the system with MES/ERP platforms to establish a full digital loop for equipment condition management in accordance with the Industry 4.0 concept.

Key words: computer vision, belt conveyor, belt defects, neural network algorithms, ResNet-18, Fast R-CNN, Mask R-CNN, automated diagnostics, segmentation, industrial safety.

Постановка проблеми

Конвеєрні системи – один з основних елементів сучасного промислового виробництва, що забезпечує безперервність технологічних процесів. Зокрема, стрічкові конвеєри масово використовуються в гірничодобувній, металургійній, переробній, та логістично-складській галузях, гарантуючи безперервну подачу сировини на наступні етапи виробництва. Від надійності стрічкових конвеєрів залежить робота цілих виробничих ліній: будь-який раптовий вихід з ладу стрічки призводить до вимушених простоїв та значних втрат. Середній строк служби конвеєрної стрічки становить приблизно 1–2 роки, але цей показник дуже варіюється і визначається багатьма факторами експлуатації (навіть в межах одного підприємства час служби двох аналогічних стрічок може суттєво відрізнятись). Вчасне виявлення дефектів стрічки та їхнє усунення є критично важливим для продовження ресурсу конвеєра та зменшення незапланованих простоїв [1].

Традиційна практика діагностики стрічкових конвеєрів на українських підприємствах базується на періодичних оглядах обладнання ремонтним персоналом. Такий підхід має істотні недоліки.

По-перше, в процесі роботи стрічка часто вкрита транспортованим матеріалом, тому оглядати її поверхню важко без зупинки конвеєра.

По-друге, на великих виробництвах неможливо одночасно зупинити всі конвеєри для перевірки, через що частина дефектів може залишатися непоміченою. Людський фактор також відіграє роль: пропущений людиною початковий дефект здатний розвинути у аварійну ситуацію, раптово зупинивши весь технологічний ланцюг. Крім того, різні дефекти мають неоднаковий вплив на виробництво: незначні пошкодження стрічки дозволяють планово виконати ремонт, тоді як критичні розриви потребують негайного втручання. Отже, актуально впроваджувати автоматизовані системи моніторингу стану стрічки в реальному часі, що виключають суб'єктивні помилки та забезпечують диференційований підхід до обслуговування різного обладнання. Одним із передових рішень є використання

комп'ютерного зору та глибокого навчання для безперервної діагностики конвеєрних стрічок. У контексті української промисловості така система дозволить підвищити надійність конвеєрів, знизити аварійність та інтегруватися у сучасні концепції Industry 4.0 (промислова автоматизація та цифровізація виробництва) [8].

Типові пошкодження конвеєрних стрічок, що призводять до відмов:

- абразивний знос стрічки. Поступове стирання гумового робочого шару під дією абразивних властивостей вантажу викликає тонке протирання та деформації стрічки. З часом це призводить до утворення небезпечних протертих ділянок;

- механічні розриви стрічки. Поява наскрізних розривів унаслідок потрапляння неперероблюваних сторонніх предметів (металевих уламків, каміння тощо) в матеріал на стрічці. Такі предмети, затиснуті між барабаном і стрічкою, можуть прорізати полотно конвеєра.

- порушення цілісності покриття через тепловий або хімічний вплив. Транспортування матеріалів із підвищеною температурою або оброблених реагентами (протизмерзаючими сумішами в зимовий період) прискорює старіння та розтріскування гумового шару стрічки. Навіть використання спеціальних маслостійких стрічок не повністю вирішує проблему: під дією агресивних хімікатів їхня поверхня поступово розм'якшується, втрачає еластичність і деформується.

Значна кількість зовнішніх факторів, що впливають на довговічність стрічок, унеможливорює встановлення єдиного нормативного строку служби конвеєрного обладнання. У цих умовах автоматизована система діагностики конвеєрів, позбавлена описаних недоліків людського контролю, здатна оперативно і точно виявляти дефекти стрічки, попереджаючи серйозні аварії та забезпечуючи стабільну роботу виробничих ліній. Таким чином, створення системи технічного зору для контролю стану конвеєрних стрічок є актуальною науково-практичною задачею для сучасної промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

За останні роки спостерігається активний розвиток методів штучного інтелекту для діагностики стану конвеєрів. Значна увага приділяється застосуванню глибокого навчання та комп'ютерного зору як ефективних інструментів моніторингу технічного стану стрічок [2]. У літературі описані як контактні методи контролю (на основі сенсорів напруги, акустичних датчиків тощо), так і безконтактні методи (машинний зір, тепловізійний аналіз) для виявлення дефектів стрічок. Безконтактні візуальні системи діагностики стрічки наразі є пріоритетним напрямом через можливість раннього виявлення пошкоджень без втручання в роботу конвеєра.

Численні дослідження демонструють ефективність нейромережевих алгоритмів у задачах розпізнавання пошкоджень конвеєрних стрічок. Наприклад, Zhang і співавт. (2021) розробили вдосконалений метод виявлення дефектів стрічки на основі алгоритму YOLOv3 з використанням нейронної мережі EfficientNet як базової моделі [3]. Цей підхід дозволив одночасно детектувати кілька типів пошкоджень стрічки та досягти середньої точності детекції ~97,3 % при швидкості ~42 кадри/с, що на 10,4 % точніше та 45,9 % швидше порівняно з базовим алгоритмом YOLOv3.

В іншій роботі тієї ж групи (Zhang et al., 2022) акцент зроблено на превентивному виявленні сторонніх об'єктів на конвеєрі, здатних пошкодити стрічку [4]. Запропоновано полегшену глибоку модель (покращена YOLOv4) для швидкого розпізнавання сторонніх предметів у потоці вугілля; вона досягла точності ~93,7 % та швидкодії 70 кадрів/с, що на 1,7 % точніше і більш ніж втричі швидше за оригінальний YOLOv4. Впровадження такого рішення дозволяє завчасно виявити чужорідний об'єкт у матеріалі та попередити розрив стрічки, істотно підвищуючи безпеку транспортування вугілля на конвеєрі.

Окремою задачею є подолання дефіциту даних для навчання нейромереж у сфері діагностики конвеєрів. Wang et al. (2024) запропонували інноваційний підхід AC-SNGAN – генеративну змагальну мережу з додатковим класифікатором для аугментації (розширення) вибірки зображень дефектів стрічки [5]. Ця модель генерує високоякісні синтетичні зображення кількох типів дефектів, що дозволяє суттєво збільшити обсяг навчальної вибірки. Результати показали, що використання AC-SNGAN дає змогу досягти точності детекції пошкоджень ~99,3 % навіть при навчанні з обмеженого набору (~200 зображень кожного класу). Таким чином, генеративні алгоритми допомагають компенсувати нестачу реальних даних про дефекти конвеєрів та підвищують надійність роботи детекторів.

Інший перспективний напрям – оптимізація нейромережевих моделей для роботи в реальному часі та на вбудованих пристроях. Так, Guo et al. (2023) розробили метод діагностики пошкоджень стрічки на основі нейромережі CenterNet із використанням технології Knowledge Distillation (передавання знань від глибокої моделі-вчителя до легшої моделі-учня) [6]. Такий підхід дозволив отримати компактний та швидкодіючий детектор дефектів без істотної втрати точності, що придатно для реалізації на периферійних обчислювальних пристроях (edge computing).

Крім комп'ютерного зору, розвиваються й сенсорні системи діагностики стрічок. Наприклад, Bzinkowski et al [1]. (2024) описують реалізацію моніторингу стрічкового конвеєра на основі тензометричних датчиків натягу стрічки та аналізу сигналів з використанням ML-алгоритмів. Експериментально показано, що така система в реальному часі розпізнає зміни навантаження на стрічку (класифікуючи тип вантажу з точністю до 100 %) і виявляє заздалегідь створені дефекти, підтверджуючи перспективність застосування машинного навчання для діагностики та предиктивного ремонту конвеєрів.

Важливим аспектом сучасних досліджень є забезпечення інтерпретованості роботи нейромережових діагностичних систем. Оскільки від цих алгоритмів залежить безпека та безперебійність промислових процесів, виникає потреба пояснювати їхні рішення.

В оглядовій роботі Górriz et al. (2023) відзначено, що глибоке навчання вже демонструє рівень точності на рівні людини в задачах технічної діагностики та автоматизації, але для широкого впровадження в критичних галузях необхідні зрозумілі пояснення для оператора [2]. Розвиток напрямку Explainable AI підвищує довіру до нейромережових моделей та спрощує інтеграцію таких систем у виробничі процеси.

Окрім технічних рішень, література акцентує увагу на питанні готовності підприємств до впровадження подібних інновацій. Зокрема, Martell et al. (2023) пропонують діагностичний інструмент для оцінювання рівня автоматизації і цифровізації виробництва як метод визначення готовності підприємства до реалізації концепції Industry 4.0 [7]. Наявність інтелектуальних систем моніторингу (таких як діагностика конвеєрів на основі нейромереж) виступає однією зі складових «цифрової зрілості» підприємства. Таким чином, аналіз останніх досліджень показує, що поєднання сучасних нейромережових алгоритмів, достатньої кількості якісних даних та врахування практичних вимог (реального часу, пояснюваності, інтеграції) є ключем до успішної реалізації систем автоматичної діагностики конвеєрного обладнання.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є розроблення методики автоматизованої діагностики стрічкового конвеєрного обладнання на основі алгоритмів глибокого навчання, яка забезпечує своєчасне виявлення дефектів конвеєрної стрічки та підвищення надійності роботи конвеєрів в умовах сучасної промисловості.

Для досягнення цієї мети вирішуються такі завдання:

- створення та анотування вибірки зображень конвеєрної стрічки з різними типами дефектів;
- навчання нейронної мережі-класифікатора для розпізнавання загального технічного стану стрічки;
- навчання нейромережового детектора для локалізації дефектів на зображенні стрічки;
- навчання моделі сегментації для точного визначення контурів і площі пошкоджень;
- оцінка ефективності запропонованої системи діагностики та визначення її переваг у порівнянні з традиційними підходами.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для реалізації поставленої мети розроблено багаторівневу систему комп'ютерного зору для моніторингу стану конвеєрної стрічки. Система складається з трьох послідовних модулів: класифікації, детекції об'єктів та сегментації. Такий підхід дозволяє спочатку визначити загальний стан стрічки (наявність дефектів), далі локалізувати виявлені дефекти на зображенні, а врешті – побудувати точні маски пошкоджених ділянок для оцінки їх площі. Навчання та тестування моделей здійснювалося на експериментальному наборі зображень, зібраному в умовах реального виробництва [10]. Нижче наведено детальний опис кожного модуля системи та отримані результати.

Класифікатор технічного стану конвеєрної стрічки.

Класифікація зображень стрічки полягає у автоматичному визначенні стану стрічки (справна чи з дефектом певного типу) на основі аналізу її зображення. Для підготовки даних було використано відеопотік з високошвидкісної камери (частота 250 кадрів/с), встановленої над рухомою стрічкою. З відео виділено тисячі окремих кадрів, на кожному з яких видно фрагмент стрічки. Кожне отримане зображення вручну віднесено до одного з класів залежно від домінуючого дефекту на стрічці. Наприклад, якщо на кадрі зафіксовано розрив або великі тріщини стрічки, таке зображення отримувало мітку класу «Розрив стрічки» – як найбільш критичний тип дефекту з точки зору безаварійної роботи обладнання. Аналогічно виділено класи інших пошкоджень (пошкодження краю стрічки, поверхневі тріщини тощо), а зображення без дефектів віднесено до класу «Нормальний стан». Для підвищення універсальності роботи класифікатора на обмеженій вибірці здійснено аугментацію даних – створено додаткові навчальні приклади шляхом випадкових геометричних та колірних трансформацій вихідних зображень (приклади наведено на рис. 1).

В якості моделі для класифікації використано згорткову нейронну мережу ResNet-18, попередньо навченої на великому наборі зображень (ImageNet). Модель імпортовано з бібліотеки PyTorch (Torchvision) і донаведено під цю задачу. Архітектура ResNet-18 складається з послідовності згорткових шарів, які виділяють ознаки зображення, та вихідного повнозв'язного шару, що виконує класифікацію. Згортка – базова операція CNN – обчислюється як розгорнутий скалярний добуток матриці ваг фільтра на відповідний фрагмент пікселів зображення. Формально результат 2D-згортки можна записати так:

$$y[m, n] = \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W x_k[m+i, n+j] \cdot W_k[i, j] + b, \quad (1)$$

де $y[m, n]$ – значення вихідного зображення (тензора ознак) у позиції (m, n) після застосування фільтра;

x_k – значення вхідного зображення в k -му каналі (колірному) за координатами $[m+i, n+j]$;

W_k – значення ваги фільтра (ядра згортки) для k -го каналу в положенні $[i, j]$;

b – зміщення (константа), яка додається до суми.

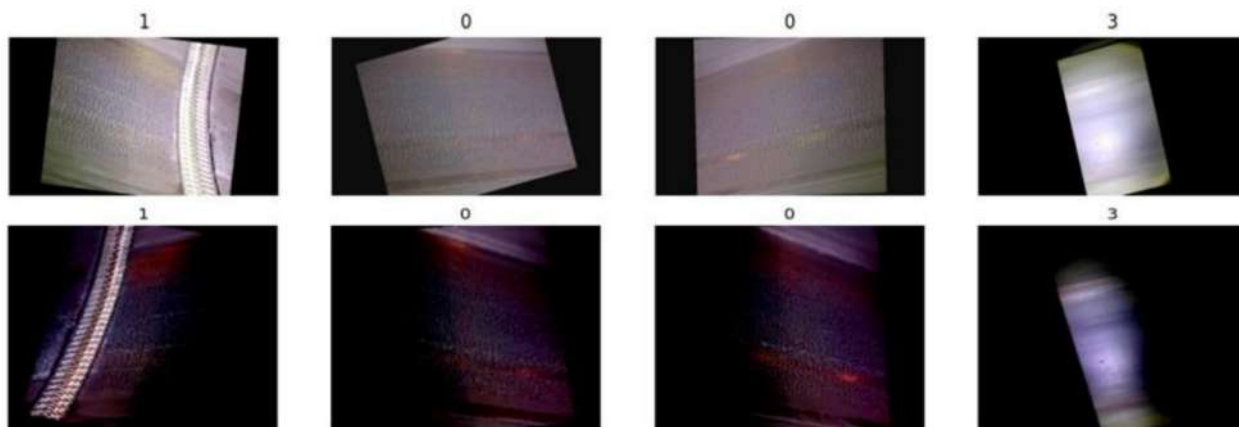


Рис. 1. Результати аугментації даних

При донавчанні ResNet-18 заморожено ваги всіх згорткових шарів (тобто градієнти на них не рахувалися, щоб зберегти наперед вивчені ознаки) і замінено лише вихідний повнозв'язний шар новим – з кількістю нейронів, що відповідає цільовим класам (у даному випадку 4 класи технічного стану стрічки).

В якості функції втрат обрана крос-ентропія `CrossEntropyLoss()`, оптимізація параметрів виконувалася методом Adam (Adaptive Moment Estimation) з навчальною вибіркою, збільшеною аугментаціями. Модель-класифікатор навчалася протягом 20 епох, після чого значення функції втрат стабілізувалося на рівні $\sim 0,07$ (тобто умовна похибка класифікації $\sim 7\%$). Результат роботи класифікатора на тестових зображеннях ілюструє рисунок 2, де показано приклад розпізнавання: модель віднесла зображення до класу «Стрічка з пошкодженим краєм».



Рис. 2. Результати роботи моделі «Стрічка з пошкодженим краєм»

Отриманий класифікатор пропонується використовувати на першому рівні діагностичної системи – для контролю наявності дефектів стрічки під час роботи конвеєра. У разі, якщо модель сигналізує про виявлення пошкодження, видається попередження для служби експлуатації щодо необхідності огляду конкретного конвеєра. Таким чином, простий у реалізації алгоритм класифікації дозволяє автоматично стежити за справним станом десятків конвеєрів одночасно і оперативно ідентифікувати стрічки, що потребують уваги фахівців. На відміну від періодичних ручних перевірок, така система моніторингу працює безперервно та не відволікає персонал, доки не буде реально зафіксовано ознаки дефекту.

Детектор дефектів конвеєрної стрічки.

Детекція об'єктів (у даному випадку – дефектів) – це задача комп'ютерного зору, яка полягає в знаходженні на зображенні об'єктів певних класів і визначенні координат їхнього розташування. На відміну від класифікації, що лише видає клас для всього зображення, детектор повертає також положення кожного знайденого об'єкта, зазвичай у вигляді координат рамки, що його обмежує. Для навчання моделі-детектора був підготовлений окремий набір даних: частина зображень стрічки (відібраних з відео) з різними дефектами була вручну розмічена за допомогою програми CVAT (Computer Vision Annotation Tool). Розмітка виконувалася у вигляді полігональних

областей на зображенні, які охоплюють видимий контур дефекту (тріщини, розриву або проблемного стику стрічки). Кожному зображенню при розмітці присвоєно унікальний ID, зазначено клас дефекту та координати полігона, що окреслює дефект. Якщо на одному фото присутні кілька дефектів, кожен із них розмічався окремо. Результати анотування збережено у форматі XML, після чого за допомогою скриптів Python ці дані конвертовано у зручну таблицю (dataframe): для кожного дефекту зберігається ім'я файлу зображення, розміри зображення, мітка класу дефекту і координати вершин полігональної області, яка його охоплює. На основі цих координат при навчанні моделі будувалися прямокутні рамки навколо дефектів – вони слугували цільовими рамками для алгоритму детекції (рис. 3).



Рис. 3. Результати розпізнавання

Як базову архітектуру детектора обрано модель Fast R-CNN – класичну згорткову нейромережу для виявлення об'єктів. В якості оптимізатора застосовано стохастичний градієнтний спуск (SGD). Правило оновлення ваг мережі при кожному кроці навчання описується виразом:

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \eta \nabla J(\theta_t; x^{(i)}, y^{(i)}), \quad (2)$$

де θ_t – вектор параметрів моделі (вагових коефіцієнтів) на t -ій ітерації;

η – коефіцієнт швидкості навчання (learning rate);

$\nabla J(\theta_t; x^{(i)}, y^{(i)})$ – градієнт функції втрат J за параметрами θ , обчислений на випадковому навчальному прикладі $(x^{(i)}, y^{(i)})$.

Після навчання детектор успішно розпізнає дефекти на контрольних зображеннях стрічки, автоматично будує рамки навколо знайдених пошкоджень та оцінює ймовірність належності кожного об'єкта до того чи іншого класу. На рисунку 3 наведено приклад спрацювання моделі: програма коректно виявила на зображенні тріщину стрічки, позначивши її рамкою з відповідним класом. Розроблений детектор здатний розпізнавати основні типи дефектів стрічки – тріщини, пориви та проблеми зі стиком – у різних положеннях кадру.

Включення модуля детекції розширює можливості діагностики конвеєрів, дозволяючи не лише визначити сам факт наявності несправності, але й точно вказати місце розташування дефекту на стрічці. Це особливо корисно для обладнання, встановленого в важкодоступних місцях (транспортери під землею, під стелею цеху, в обмеженому просторі тощо), де оперативний доступ персоналу ускладнений. У таких випадках автоматичний детектор може повністю замінити первинний огляд: система сама «покаже», де саме на стрічці виникла проблема, і чи потребує вона негайного втручання. Таким чином, пропонується модель-детектор здатна знизити навантаження на сервісні служби та підвищити швидкість реагування на потенційно аварійні ситуації [9].

Сегментація дефектів стрічки.

Для поглибленого аналізу пошкоджень реалізовано модуль семантичної сегментації, задача якого – піксельно точно виділити область дефекту на зображенні. Сегментація ділить зображення на кілька областей, кожна з яких відповідає певному об'єкту чи частині об'єкту. У даному випадку сегментація дозволяє побудувати точну маску дефекту стрічки, тобто контур тріщини чи розриву (рис. 4).

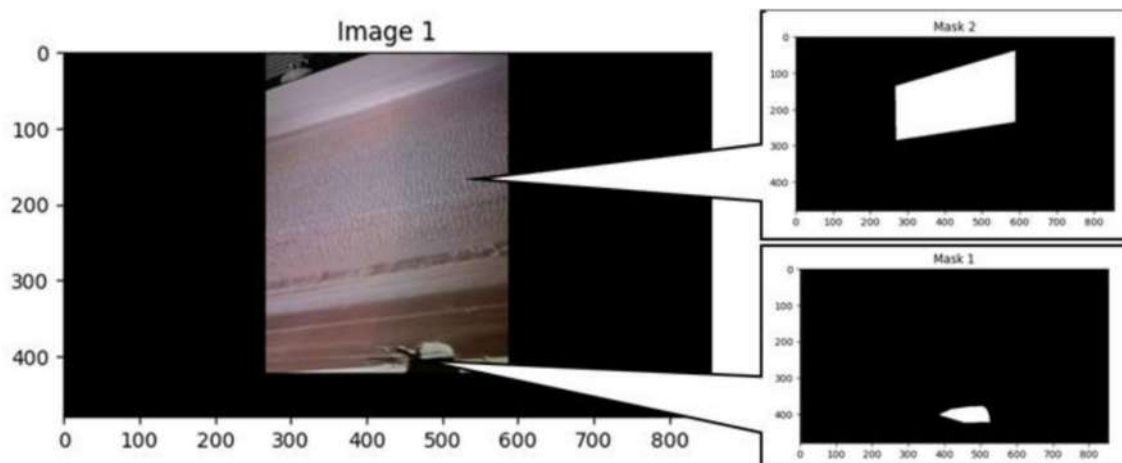


Рис. 4. Маски об'єктів типу «тріщина» та «розрив краю стрічки»

Це дає більш детальну інформацію про характер і розмір пошкодження, ніж проста рамка детектора. Для вирішення задачі сегментації використано неймережеву модель Mask R-CNN – сучасне розширення архітектури R-CNN, що одночасно виконує і детекцію об'єктів, і побудову масок цих об'єктів. Головна відмінність Mask R-CNN від детектора Fast R-CNN полягає у додатковій гілці нейронної мережі, яка генерує бінарну маску для кожного знайденого об'єкта, а не лише координати рамки. Таким чином, Mask R-CNN може сегментувати об'єкти на зображенні, вирішуючи дану задачу.

Модель Mask R-CNN було ініціалізовано з відкритих попередньо навчених ваг (COCO dataset) і донавчено на датасеті анотованих зображень стрічок. Оскільки для навчання сегментації потрібні точні маски дефектів, ми використали наявну полігональну розмітку: вона була перетворена у растрові маски відповідних областей. Таким чином, неймережа отримала на вході зображення стрічки, а як правильний результат – карту сегментації, де пікселі дефекту позначені 1, фон – 0. Функція втрат моделі містила дві складові: похибку класифікації (для правильного розпізнавання класу дефекту) та похибку сегментації (для точності побудови маски). Після завершення навчання Mask R-CNN продемонструвала здатність правильно виділяти пікселі дефектів навіть у складних випадках (наприклад, коли тріщина межує з краєм стрічки або заповнена матеріалом).

Результати передбачення роботи моделі на тестовій вибірці зображень представлені рисунку 5.



Рис. 5. Виділення дефектів стрічки по контуру їх розташування

Математично вихід моделі сегментації для кожної виявленої області можна подати як:

$$m = \text{sigmoid}(W_m \cdot f(x_i)), \quad (3)$$

де m – двовимірна матриця (маска сегментації) для i -тої області інтересу;

W_m – навчена матриця ваг сегментаційної гілки;

$f(x_i)$ – вектор ознак, виділених з ROI базовою CNN;

$\text{sigmoid}()$ – логістична функція активації, що перетворює вихідні значення у діапазон $[0; 1]$ (ймовірність належності пікселя до класу «дефект»).

У результаті застосування сигмоїди отримуємо маску, значення якої порогуються для отримання бінарного зображення області дефекту.

Сегментація дефектів стрічки значно розширює можливості діагностики. По-перше, знаючи точну форму та площу дефектної області, можна кількісно оцінити ступінь пошкодження стрічки. Це, в свою чергу, дозволяє прогнозувати залишковий ресурс стрічки – наприклад, на основі площі наскрізних розривів або загальної довжини тріщин можна приблизно розрахувати, скільки часу стрічка ще зможе пропрацювати без аварій.

По-друге, характерні риси маски (форма дефекту, положення відносно країв стрічки) дають можливість ідентифікувати причини виникнення пошкодження. Зокрема, розташування тріщин вздовж напрямку руху може вказувати на перевантаження або неякісне центрування стрічки; множинні дрібні дефекти по всій ширині – на абразивний знос; пошкодження переважно по краях – на проблеми з роликками або траєкторією стрічки. Такий аналіз допомагає розробити коригувальні заходи для усунення або послаблення негативних чинників, що спричиняють деградацію стрічок.

Висновки

У роботі представлено підхід до автоматизованої діагностики стрічкового конвеєрного обладнання на основі нейромережових алгоритмів комп'ютерного зору, адаптований до умов сучасної промисловості. Розроблено трирівневу систему технічного зору, що включає: модуль класифікації для моніторингу загального стану стрічки, модуль детекції для локалізації дефектів та модуль сегментації для деталізованої оцінки пошкоджень. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність запропонованого рішення. Класифікатор на базі ResNet-18 успішно розрізняє наявність дефектів на стрічці у реальному часі, що дозволяє оперативно виявити проблемний конвеєр і залучити персонал лише за потреби. Нейромережовий детектор (Fast R-CNN) забезпечує автоматичне знаходження типових дефектів (тріщин, розривів, несправних стиків) на зображеннях з високою точністю, усуваючи фактор людських помилок при огляді. Модуль сегментації (Mask R-CNN) надає повну картину пошкоджень – будує точні маски дефектних зон, що дозволяє розрахувати площу пошкодження і краще зрозуміти природу дефекту.

У цілому, впровадження такої системи дасть змогу перейти від реагування на аварії до їх попередження: модель фіксує дефект стрічки на ранній стадії, оцінює його критичність та інформує службу експлуатації, яка може завчасно спланувати ремонт з мінімальним впливом на виробництво.

Практична цінність отриманих результатів для української промисловості полягає в підвищенні надійності та безпечності роботи конвеєрів. Система комп'ютерного зору працює цілодобово і не потребує зупинки обладнання, тому ризик пропустити небезпечний дефект знижується до мінімуму.

Однак необхідно зазначити, що для стабільної роботи системи в польових умовах необхідно використовувати промислові відеокамери зі ступенем захисту не нижче IP64 (витримують пил і вологу). В ході дослідження було застосовано саме такі камери, що підтвердило їх придатність – отримані зображення достатньо якісні для аналізу алгоритмами.

Запропоноване рішення легко масштабується і інтегрується у ширші інформаційні системи підприємства. В перспективі дані, отримані від моделей діагностики (про місця та ступінь пошкоджень стрічок), можна використовувати для оптимізації графіка обслуговування різних конвеєрів за ступенем їх критичності для виробництва. Наприклад, конвеєри, відмови яких паралізують всю лінію, повинні оглядатися/замінюватися в першу чергу. Інтеграція системи моніторингу стрічок з корпоративними платформами рівня MES/ERP дозволить автоматично враховувати її показники при плануванні ремонтів і замовленні запасних частин, що відповідає концепції «розумного» виробництва (Industry 4.0). Загалом, результати роботи демонструють, що застосування нейромережових алгоритмів для діагностики конвеєрного обладнання є дієвим шляхом підвищення ефективності українських промислових підприємств, забезпечуючи безперервність та безпеку технологічних процесів.

Список використаної літератури

1. Application of machine learning algorithms in real-time monitoring of conveyor belt damage / D. Bzinkowski та ін. *Applied sciences*. 2024. Т. 14, № 22. С. 10464. URL: <https://doi.org/10.3390/app142210464>
2. Computational approaches to Explainable Artificial Intelligence: advances in theory, applications and trends / J. M. Górriz та ін. *Information fusion*. 2023. Т. 100. С. 101945. URL: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.101945>
3. Deep learning-based damage detection of mining conveyor belt / M. Zhang та ін. *Measurement*. 2021. Т. 175. С. 109130. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109130>
4. Proactive measures to prevent conveyor belt failures: deep learning-based faster foreign object detection / M. Zhang та ін. *Engineering failure analysis*. 2022. С. 106653. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106653>

5. AC-SNGAN: Multi-class data augmentation for damage detection of conveyor belt surface using improved ACGAN / G. Wang та ін. *Measurement*. 2023. С. 113814. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113814>
6. Machine vision based damage detection for conveyor belt safety using Fusion knowledge distillation / X. Guo та ін. *Alexandria engineering journal*. 2023. Т. 71. С. 161–172. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.03.034>
7. Evaluation of the degree of automation and digitalization using a diagnostic and analysis tool for a methodological implementation of industry 4.0 / F. Martell та ін. *Computers & industrial engineering*. 2023. С. 109097. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109097>
8. Хрустальова С., Слюсар А. Використання новітніх логістичних технологій для оптимізації діяльності сучасних підприємств. *Радіoeлектроніка та молодь у XXI столітті. Т. 2: Конференція «Автоматизовані системи та комп'ютеризовані технології радіoeлектронного приладобудування»*. Харків, Україна, 2024. URL: <https://doi.org/10.30837/iyf.asctredb.2024.047>
9. Слюсар А. П., Хрустальова С. В. Методи та алгоритми локалізації RFID-міток: сучасні підходи та перспективи. *Виробництво & мехатронні системи 2024: матеріали VIII-ої Міжнар. конф., м. Kharkiv, 25–26 жовт. 2024 р. Kharkiv, 2024. С. 87–91.*
10. Application of bayes theory model to determine the optimal variant of technological process for production of MEMS components / I. Nevliudov та ін. *2024 IEEE 19th international conference on the perspective technologies and methods in MEMS design (MEMSTECH)*, м. Zozuli, Ukraine, 16–19 трав. 2024 р. 2024. С. 24–28. URL: <https://doi.org/10.1109/memstech63437.2024.10620011>

References

1. Bzinkowski, D., Rucki, M., Chalko, L., Kilikevicius, A., Matijosius, J., Cepova, L., & Ryba, T. (2024). Application of machine learning algorithms in real-time monitoring of conveyor belt damage. *Applied Sciences*, 14(22), 10464. <https://doi.org/10.3390/app142210464>
2. Górriz, J. M., Álvarez-Illán, I., Álvarez-Marquina, A., Arco, J. E., Atzmueller, M., Ballarini, F., Barakova, E., Bologna, G., Bonomini, P., Castellanos-Dominguez, G., Castillo-Barnes, D., Cho, S. B., Contreras, R., Cuadra, J. M., Domínguez, E., Domínguez-Mateos, F., Duro, R. J., Elizondo, D., Fernández-Caballero, A.,... Ferrández-Vicente, J. M. (2023). Computational approaches to Explainable Artificial Intelligence: Advances in theory, applications and trends. *Information Fusion*, 100, 101945. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.101945>
3. Zhang, M., Shi, H., Zhang, Y., Yu, Y., & Zhou, M. (2021). Deep learning-based damage detection of mining conveyor belt. *Measurement*, 175, 109130. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109130>
4. Zhang, M., Cao, Y., Jiang, K., Li, M., Liu, L., Yu, Y., Zhou, M., & Zhang, Y. (2022). Proactive measures to prevent conveyor belt failures: Deep learning-based faster foreign object detection. *Engineering Failure Analysis*, 106653. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106653>
5. Wang, G., Yang, Z., Sun, H., Zhou, Q., & Yang, Z. (2023). AC-SNGAN: Multi-class data augmentation for damage detection of conveyor belt surface using improved ACGAN. *Measurement*, 113814. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113814>
6. Guo, X., Liu, X., Gardoni, P., Glowacz, A., Królczyk, G., Incecik, A., & Li, Z. (2023). Machine vision based damage detection for conveyor belt safety using Fusion knowledge distillation. *Alexandria Engineering Journal*, 71, 161–172. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.03.034>
7. Martell, F., López, J. M., Sánchez, I. Y., Paredes, C. A., & Pisano, E. (2023). Evaluation of the degree of automation and digitalization using a diagnostic and analysis tool for a methodological implementation of industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, 109097. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109097>
8. Khrustaleva, S., & Slyusar, A. (2024). Using the latest logistics technologies to optimise the activities of modern enterprises. In *Radioelectronics and Youth in the 21st Century. Vol. 2: Conference 'Automated Systems and Computerised Technologies in Radioelectronics Instrument Engineering'*. Press of the Kharkiv National University of Radioelectronics. <https://doi.org/10.30837/iyf.asctredb.2024.047>
9. Slyusar, A. P., & Khrustalova, S. V. (2024). Methods and algorithms for localising RFID tags: Modern approaches and prospects. In *Production & Mechatronic Systems 2024* (pp. 87–91).
10. Nevliudov, I., Khrustalova, S., Chala, O., & Slyusar, A. (2024). Application of bayes theory model to determine the optimal variant of technological process for production of MEMS components. У *2024 IEEE 19th international conference on the perspective technologies and methods in MEMS design (MEMSTECH)* (с. 24–28). IEEE. <https://doi.org/10.1109/memstech63437.2024.10620011>

Дата першого надходження статті до видання: 08.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

Yu. M. FEDENKO

Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Technology of Inorganic Substances,
Water Treatment and General Chemical Technology
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-8599-1717

REVIEW OF METHODS FOR PREPARING HIGHLY PURIFIED WATER FOR INJECTIONS. ENVIRONMENTAL ASPECTS

The development of the pharmaceutical industry is important for humanity because it ensures a better standard of living. The development of new drugs makes it possible to overcome diseases that were previously considered incurable. One of the key aspects of ensuring the proper quality of medicines is the use of water of appropriate quality. According to the State Pharmacopoeia of Ukraine, water is classified as purified water; highly purified water; and water for injection. The latter is subject to the most stringent requirements, such as the complete absence of pyrogens, organic and inorganic impurities, and sterility. It is used to prepare injection solutions and other medicines that are administered directly into the bloodstream, so inadequate water quality can cause adverse reactions in the body or even pose a threat to the patient's life.

Water for injections is a key component in the production of sterile medicinal products for parenteral, ophthalmic, and inhalation use. It can also be used to prepare solutions for cell culture growth and to flush production equipment. The highest quality requirements are imposed on it, which in Ukraine are regulated by the provisions of the State Pharmacopoeia of Ukraine, harmonized with the relevant provisions of the European Pharmacopoeia. According to these documents, water for injections must not contain any impurities that could cause a negative reaction in the body or reduce the effectiveness of the drug. One of the main requirements is the complete absence of microorganisms and pyrogens, i.e., the water must not cause infection of the body or cause an increase in body temperature, increased heart rate, nausea, and other side effects when administered.

Historically, distillation was the only legally approved method of obtaining water for injections in various countries, as it ensured the effective removal of bacteria and endotoxins from water. However, the development of membrane water treatment technologies has changed the approach to the development of WTI systems. In 2017, the European Pharmacopoeia allowed the use of reverse osmosis in combination with electrodeionization or ultrafiltration as a method equivalent to distillation. In 2024, the Ministry of Health of Ukraine took into account the changes in the European Pharmacopoeia, and the use of membrane methods became possible at pharmaceutical enterprises in Ukraine.

Key words: distillation process, multi-stage distillation, steam compression distillation, higher-temperature steam, evaporation column.

Ю. М. ФЕДЕНКО

кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри технології неорганічних речовин,
водоочищення та загальної хімічної технології
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-8599-1717

ОГЛЯД МЕТОДІВ ПІДГОТОВКИ ГЛИБОКООЧИЩЕНОЇ ВОДИ ДЛЯ ІН'ЄКЦІЙ. ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ

Розвиток фармацевтичної промисловості є важливим для людства, оскільки забезпечує кращий рівень життя. Розробка нових препаратів робить можливим подолання хвороб, що раніше вважались невиліковними. Одним із ключових аспектів забезпечення належної якості лікарських засобів є використання води відповідної якості. Згідно з Державною Фармакопеєю України, вода класифікується на воду очищену, воду високоочищену та воду для ін'єкцій. До останньої висуваються найсуворіші вимоги, такі як повна відсутність пірогенів, домішок органічного та неорганічного походження та стерильність. Вона використовується для приготування ін'єкційних розчинів та інших лікарських засобів, що вводяться безпосередньо у кров, тому невідповідна якість води може викликати побічні реакції організму або навіть становити загрозу життя пацієнта.

Вода для ін'єкцій є ключовим компонентом при виробництві стерильних лікарських засобів для парентерального, офтальмологічного та інгаляційного застосування. Також вона може використовуватись для приготування розчину для росту клітинних культур та промивання виробничого обладнання. До її якості висуваються найвищі вимоги, що в Україні регламентуються положеннями Державної Фармакопеї України, гармонізованими з відповідними настановами Європейської фармакопеї. Згідно з цими документами, вода для ін'єкцій не повинна



містити жодних домішок, які можуть викликати негативну реакцію організму або знизити ефективність лікарського засобу. Однією з основних вимог є повна відсутність мікроорганізмів та пірогенів, тобто вода не має призводити до зараження організму та не викликами підвищення температури тіла, почастищення пульсу, нудоту та інші побічні реакції при введенні.

Історично дистиляція була єдиним законодавчо затвердженим методом отримання води для ін'єкцій у різних країнах, оскільки вона забезпечувала ефективне видалення бактерій та ендотоксинів з води. Однак, розвиток мембранних технологій водопідготовки дозволив змінити підхід до розробки систем підготовки ВДІ. Так, у 2017 році Європейська фармакопея дозволила використання зворотного осмосу у комбінації з електродеіонізацією або ультрафільтрацією, як метод, що еквівалентний дистиляції. У 2024 році Міністерство охорони здоров'я України врахувала зміни Європейської фармакопеї і використання мембранних методів стало можливим на фармацевтичних підприємствах України.

Ключові слова: дистиляція, багатоступенева дистиляція, дистиляція з компресією пари, високотемпературна пара, випарна колона.

Statement of the problem

Water for injections is a key component in the production of sterile medicinal products for parenteral, ophthalmic, and inhalation use. It can also be used to prepare solutions for cell culture growth and to flush production equipment. The highest quality requirements are imposed on it, which in Ukraine are regulated by the provisions of the State Pharmacopoeia of Ukraine, harmonized with the relevant provisions of the European Pharmacopoeia. According to these documents, water for injections must not contain any impurities that could cause a negative reaction in the body or reduce the effectiveness of the drug. One of the main requirements is the complete absence of microorganisms and pyrogens, i.e., the water must not cause infection of the body or cause an increase in body temperature, increased heart rate, nausea, and other side effects when administered [1–3].

Historically, distillation was the only legally approved method of obtaining water for injections in various countries, as it ensured the effective removal of bacteria and endotoxins from water. However, the development of membrane water treatment technologies has changed the approach to the development of WTI preparation systems. In 2017, the European Pharmacopoeia allowed the use of reverse osmosis in combination with electrodeionization or ultrafiltration as a method equivalent to distillation. In 2024, the Ministry of Health of Ukraine took into account the changes in the European Pharmacopoeia, and the use of membrane methods became possible at pharmaceutical enterprises in Ukraine [4].

Analysis of recent research and publications

The distillation process involves the transition of water from a liquid phase to a vapor phase, followed by condensation. This removes all non-volatile impurities, and the high operating temperatures ensure the microbiological purity of the finished distillate. Distillation apparatus of various designs can be used in the pharmaceutical industry. The multi-stage distillation method has become the most popular in European countries, while steam compression distillation has become the common method in US pharmaceutical companies [5,6].

The multi-stage distillation method involves the use of several columns connected in series, the main function of which is the repeated use of thermal energy. A distinctive feature of this design is that water evaporation using superheated technical steam occurs only in the first column [7].

When using the steam compression distillation method, the condensation of the formed steam occurs at higher temperatures than atmospheric pressure, since the steam pressure increases [8].

Purpose of the study

The purpose of this article is to critically analyze existing modern technologies for the preparation of deeply purified water for use in pharmaceutical production, namely for injections.

Presentation of the main research material

The multi-stage distillation method involves the use of several columns connected in series, the main function of which is the repeated use of thermal energy. A distinctive feature of this design is that water evaporation using superheated technical steam occurs only in the first column. First, water is sprayed by nozzles onto the surface of the heater and evaporates. The resulting pure steam passes through a pipeline to the second column, where heat exchange occurs between it and the water sprayed onto the outer surface of the pipes. The steam from the first stage is cooled, forming a distillate that is removed from the evaporator, and the water supplied to the second column turns into steam and passes through a pipeline to the next column. This process takes place in each column of the apparatus, the number of which varies depending on the production needs for distillate [9–11].

In this system, a condenser is installed at the outlet of the last column to cool the steam. For greater energy efficiency of this method, the outlet water can be used as a source of cold water, which, passing through the heat exchanger pipe, is additionally heated by the heat of the steam from the last section, cooling it. An example of a multi-stage distiller with three columns is shown in Fig. 1 [12].

To ensure that the distillate meets the requirements of the State Pharmacopoeia of Ukraine and to prevent salt deposits on the internal surfaces of the equipment, the feed water must undergo preliminary treatment: degassing, purification from organic contaminants, mechanical impurities, and partial removal of salts [13].

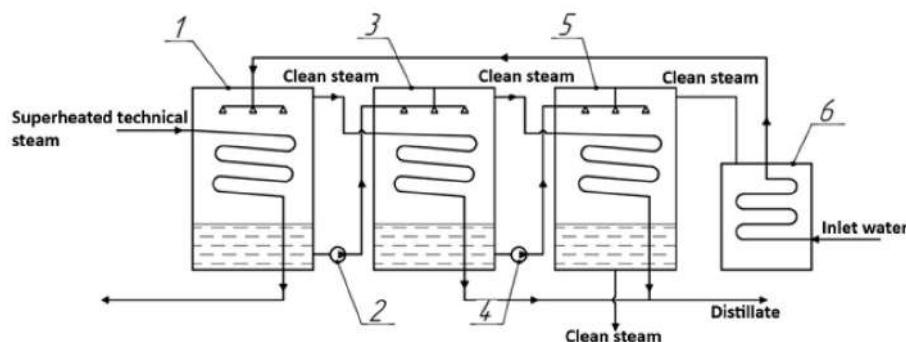


Fig. 1. Scheme of a multi-stage distiller

1,3,5 – evaporation columns; 2,4 – pumps; 6 – condenser

The main advantages of multi-stage distillation are the reliability of the process and the stability of the distillate quality. High operating temperatures ensure water disinfection, and the evaporation process effectively removes microorganisms, pyrogens, dissolved salts, and other non-volatile contaminants, ensuring that the water composition complies with VDI standards [14,15].

The reuse of thermal energy generated in the first evaporation column to heat water at other stages makes this process energy efficient. Such a system significantly reduces energy consumption, but its consumption remains quite high, which can lead to significant financial costs for the enterprise [16].

The use of complex equipment entails high costs for the enterprise to install this distillation system, and its large dimensions can be a problem for installation in enterprises with limited working space. In addition, a multi-stage distiller requires constant maintenance to clean the internal surfaces from scale, which can impair heat transfer in the columns [17].

When using the steam compression distillation method, the condensation of the formed steam occurs at higher temperatures than atmospheric pressure, since the steam pressure increases. First, water is fed to the evaporator and heated to 100 °C, after which a pump reduces the pressure in the evaporator, accompanied by the evaporation of water at lower temperatures. The steam formed is fed to the compressor, where it is compressed, resulting in an increase in the pressure and temperature of the gas phase. The resulting higher-temperature steam meets the heat exchanger, because of which the released heat is fed to the evaporator to heat the next portion of water, and the water vapor condenses and the resulting distillate is removed from the system. An example of a steam compression distiller is shown on Fig. 2 [18–20].

The main advantages of steam compression distillers are high energy efficiency, which is due to the use of steam heat to heat the feed water. Also, reducing the pressure in the evaporation column lowers the boiling point of water, which minimizes the risk of corrosion and scale formation. Another advantage is the compactness of the installation, which allows it to be installed in limited production space [21].

The disadvantages of this method are the high initial costs of purchasing and installing the equipment. The complexity of the design also increases the maintenance costs of the distillation unit. Despite the energy efficiency of the steam conversion distiller, energy costs can be significant, especially for large systems [22].

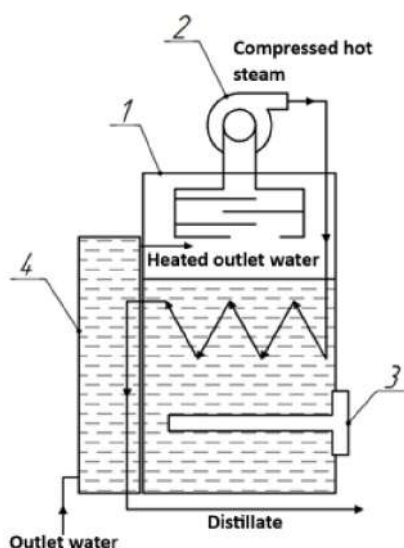


Fig. 2. Scheme of a steam compression distiller

1 – evaporation column; 2 – compressor; 3 – heater; 4 – heat exchanger

Conclusions

The distillation process involves the transition of water from a liquid phase to a vapor phase, followed by condensation. This removes all non-volatile impurities, and the high operating temperatures ensure the microbiological purity of the finished distillate.

The multi-stage distillation method involves the use of several columns connected in series, the main function of which is the repeated use of thermal energy. A distinctive feature of this design is that water evaporation using superheated technical steam occurs only in the first column.

The main advantages of steam compression distillers are high energy efficiency, which is due to the use of steam heat to heat the feed water. Also, reducing the pressure in the evaporation column lowers the boiling point of water, which minimizes the risk of corrosion and scale formation. Another advantage is the compactness of the installation, which allows it to be installed in limited production space.

Bibliography

1. Al-Nagdy A., Omara M. A., Abdelaziz G. B. Improving solar distillation performance using a conical solar still combined with hang wick and ultrasonic mist generator: thermoenviroeconomic assessment. *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 377. P. 134371.
2. Asif S., Aamer A., Quist-Jensen C. A. Membrane distillation crystallization's parametric analysis for magnesium sulphate crystallization from simulated nanofiltration brine. *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 376. P. 133852.
3. Shadi E., Pourafshari Chenar M., Sabzekar M. Fabrication of novel omniphobic polypropylene membrane for efficient direct contact membrane distillation of produced water. *Journal of Membrane Science*. 2025. Vol. 736. P. 124632.
4. Doguwa A., Azeem M.A., Hilal A. Bio-inspired surface engineered multilayer Janus membrane for efficient desalination of highly saline water in membrane distillation. *NPJ Clean Water*. 2025. Vol. 8. P. 138456.
5. Haqiqi M., Dussi S., Garcia-Navarro J. Multi-effect distillation for water desalination in an offshore PEM electrolyser system. *Energy Reports*. 2025. Vol. 14. P. 1452–1466.
6. Jeong S., Gu B., Gyeong Hwan C. CNT spacer-induced cooling crystallization: a novel approach to mitigate membrane scaling in membrane distillation without chemicals. *NPJ Clean Water*. 2025. Vol. 8. P. 183295.
7. Yingchao D., Violet C., Sun C. Ceramic-carbon Janus membrane for robust solar-thermal desalination. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16. P. 142764.
8. Arias A., Ribeiro J. M. Urban wastewater treatment plants as resource hubs: evaluating circularity and sustainability of nutrient recovery and water reuse. *Water Research*. 2025. Vol. 287. P. 124406.
9. Mupambwa H. A., Handura B. Exploring freshwater generation in the Namib Desert: The potential of passive fog harvesting and solar stills. *Soil and Tillage Research*. 2025. Vol. 254. P. 106718.
10. Li Z., Shoutian Q., Wang L. Hydrophobic block copolymer ultrafiltration membranes for anti-scaling durable membrane distillation crystallization. *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 374. P. 133614.
11. Hu Q., Xu Y., Chuanxiang Z. Sustainable and clean separation process of triethylamine/methanol/water ternary azeotrope based on mechanism analysis and multiple performance evaluation. *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 373. P. 133587.
12. Jiangbo W., Su M., Du X. Study on the performance of air gap membrane distillation enhanced by bionic cone array condensate plate structure with cactus spines. *Applied Thermal Engineering*. 2025. Vol. 279. P. 127844.
13. Kotb M. A., Khalifa A. E. A novel vacuum membrane distillation system with water ejector: Performance assessment and optimization. *Energy Conversion and Management*. 2025. Vol. 343. P. 120239.
14. Sharma M. K. He Z. Effect of operating temperature on vapor permeability of porous hydrophobic membranes used in membrane distillation. *Journal of Membrane Science*. 2025. Vol. 735. P. 124585.
15. De Aguiar D., De Oliveira G., Sinisterra R. Modified electrospun nanofiber membranes to prevent fouling and pore wetting in membrane distillation: a review. *Desalination*. 2025. Vol. 614. P. 119209.
16. Feng S., Liu J., Gao J. Enhancing the efficiency of solar interface distillation and the removal of low-concentration s-VOCs using CuFC/SiO₂-SH nanofibers. *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 372. P. 133483.
17. Burcu P., Coskun A. High performance purification of seawater brines by osmotic buoyancy membrane distillation. *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 372. P. 133469.
18. Bahutair W., Darra R., Al-Othman A. Purifying the future: Membrane technologies for ultrapure water supply in hydrogen production. *Desalination*. 2025. Vol. 614. P. 119174.
19. El Younossi C., El Fadar A., Elaouzy Y. Comprehensive investigation of desalination technologies considering numerous plants worldwide. *Applied Thermal Engineering*. 2025. Vol. 278. P. 127216.
20. Celik Madenli E., Kaleli M., Kitis M. Polyphenol Recovery from Rose-Processing Wastewater Using Ceramic Membranes. *Journal of Environmental Engineering (United States)*. 2025. Vol. 151. P. 04025069.
21. Wang A., Xu H., Ma J. Nano Copper Sulfide-Doped nanofiber surface on polylactic acid substrate for advanced photothermal membrane distillation. *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 370. P. 133306.

22. Zhang Y., He J., Li D. Evaluation of machine learning applied in membrane-based water desalination: A review. *Desalination*. 2025. Vol. 613. P. 119041.

References

1. Al-Nagdy A., Omara M. A., Abdelaziz G.B. (2025) Improving solar distillation performance using a conical solar still combined with hang wick and ultrasonic mist generator: thermoenviroeconomic assessment. *Separation and Purification Technology*, (377), pp. 134371.
2. Asif S., Aamer A., Quist-Jensen C. A. (2025) Membrane distillation crystallization's parametric analysis for magnesium sulphate crystallization from simulated nanofiltration brine. *Separation and Purification Technology*, (376), pp. 133852.
3. Shadi E., Pourafshari Chenar M., Sabzekar M. (2025) Fabrication of novel omniphobic polypropylene membrane for efficient direct contact membrane distillation of produced water. *Journal of Membrane Science*, (736), pp. 124632.
4. Doguwa A., Azeem M. A., Hilal A. (2025) Bio-inspired surface engineered multilayer Janus membrane for efficient desalination of highly saline water in membrane distillation. *NPJ Clean Water*, (8), pp. 138456.
5. Haqiqi M., Dussi S., Garcia-Navarro J. (2025) Multi-effect distillation for water desalination in an offshore PEM electrolyser system. *Energy Reports*, (14), pp. 1452–1466.
6. Jeong S., Gu B., Gyeong Hwan C. (2025) CNT spacer-induced cooling crystallization: a novel approach to mitigate membrane scaling in membrane distillation without chemicals. *NPJ Clean Water*, (8), pp. 183295.
7. Yingchao D., Violet C., Sun C. (2025) Ceramic-carbon Janus membrane for robust solar-thermal desalination. *Nature Communications*, (16), pp. 142764.
8. Arias A., Ribeiro J. M. (2025) Urban wastewater treatment plants as resource hubs: evaluating circularity and sustainability of nutrient recovery and water reuse. *Water Research*, (287), pp. 124406.
9. Mupambwa H. A., Handura B. (2025) Exploring freshwater generation in the Namib Desert: The potential of passive fog harvesting and solar stills. *Soil and Tillage Research*, (254), pp. 106718.
10. Li Z., Shoutian Q., Wang L. (2025) Hydrophobic block copolymer ultrafiltration membranes for anti-scaling durable membrane distillation crystallization. *Separation and Purification Technology*, (374), pp. 133614.
11. Hu Q., Xu Y., Chuanxiang Z. (2025) Sustainable and clean separation process of triethylamine/methanol/water ternary azeotrope based on mechanism analysis and multiple performance evaluation. *Separation and Purification Technology*, (373), pp. 133587.
12. Jiangbo W., Su M., Du X. (2025) Study on the performance of air gap membrane distillation enhanced by bionic cone array condensate plate structure with cactus spines. *Applied Thermal Engineering*, (279), pp. 127844.
13. Kotb M. A., Khalifa A. E. (2025) A novel vacuum membrane distillation system with water ejector: Performance assessment and optimization. *Energy Conversion and Management*, (343), pp. 120239.
14. Sharma M. K., He Z. (2025) Effect of operating temperature on vapor permeability of porous hydrophobic membranes used in membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, (735), pp. 124585.
15. De Aguiar D., De Oliveira G., Sinisterra R. (2025) Modified electrospun nanofiber membranes to prevent fouling and pore wetting in membrane distillation: a review. *Desalination*, (614), pp. 119209.
16. Feng S., Liu J., Gao J. (2025) Enhancing the efficiency of solar interface distillation and the removal of low-concentration s-VOCs using CuFC/SiO₂-SH nanofibers. *Separation and Purification Technology*, (372), pp. 133483.
17. Burcu P., Coskun A. (2025) High performance purification of seawater brines by osmotic buoyancy membrane distillation. *Separation and Purification Technology*, (372), pp. 133469.
18. Bahutair W., Darra R., Al-Othman A. (2025) Purifying the future: Membrane technologies for ultrapure water supply in hydrogen production. *Desalination*, (614), pp. 119174.
19. El Younossi C., El Fadar A., Elaouzy Y. (2025) Comprehensive investigation of desalination technologies considering numerous plants worldwide. *Applied Thermal Engineering*, (278), pp. 127216.
20. Celik Madenli E., Kaleli M., Kitis M. (2025) Polyphenol Recovery from Rose-Processing Wastewater Using Ceramic Membranes. *Journal of Environmental Engineering (United States)*, (151), pp. 04025069.
21. Wang A., Xu H., Ma J. (2025) Nano Copper Sulfide-Doped nanofiber surface on polylactic acid substrate for advanced photothermal membrane distillation. *Separation and Purification Technology*, (370), pp. 133306.
22. Zhang Y., He J., Li D. (2025) Evaluation of machine learning applied in membrane-based water desalination: A review. *Desalination*, (613), pp. 119041.

Дата першого надходження статті до видання: 17.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

ЦИНЬ С.

здобувачка третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти
кафедри транспортних систем і логістики
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
ORCID: 0009-0009-3736-619X

Є. В. ЛЮБИЙ

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри транспортних систем і логістики
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
ORCID: 0000-0003-0681-0920

ОЦІНЮВАННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ІНТЕРВАЛЬНОЇ КОНЦЕПЦІЇ В ПІДВИЩЕННІ ДОСТОВІРНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОПИТУ

Мета дослідження полягає в оцінюванні результатів моделювання випадкових матриць пасажирських кореспонденцій у межах інтервальної концепції формування транспортного попиту на пересування пасажирів міським громадським транспортом із застосуванням поетапного методу генерації матриць кореспонденцій.

Наукова новизна дослідження заключається в удосконаленні підходу до формування матриць пасажирських кореспонденцій шляхом застосування поетапного випадкового методу генерації, який забезпечує гарантоване виконання системи базових і додаткових обмежень, зокрема з урахуванням місткостей транспортних районів з відправлення та прибуття пасажирів і кривої розселення населення, що дозволяє суттєво звузити пошуковий інтервал можливих станів транспортного попиту.

Результати дослідження включають формування множини випадкових матриць пасажирських кореспонденцій для моделі транспортного попиту м. Харкова, їх інтервальне оцінювання за показниками транспортної роботи та середньої дальності поїздки, а також визначення найбільш ймовірних станів матриць кореспонденцій. Встановлено, що використання поетапного методу генерації забезпечує значне зменшення діапазонів можливих значень оцінних параметрів порівняно з традиційними підходами та екстремальними варіантами матриць, що підвищує достовірність результатів моделювання транспортного попиту.

Висновки полягають у тому, що застосування поетапного методу генерації матриць пасажирських кореспонденцій підвищує точність, стабільність і прогнозу надійність моделей транспортного попиту в межах інтервальної концепції, забезпечує більш реалістичне відтворення закономірностей пересування пасажирів та створює надійну основу для обґрунтування управлінських рішень у сфері планування й розвитку систем міського громадського транспорту.

Ключові слова: громадський транспорт, інтервальна концепція, матриця пасажирських кореспонденцій, моделювання, транспортний попит.

QIN X.

Postgraduate Student at the Department of Transport Systems and Logistics
Kharkiv National Automobile and Highway University
ORCID: 0009-0009-3736-619X

YE. V. LIUBYI

PhD in Transport Systems, Associate Professor,
Head of the Department of Transport Systems and Logistics
Kharkiv National Automobile and Highway University
ORCID: 0000-0003-0681-0920

ASSESSING THE POTENTIAL OF THE INTERVAL CONCEPT IN IMPROVING THE RELIABILITY OF TRANSPORT DEMAND MODELING RESULTS

The purpose of the study is to evaluate the results of modeling random passenger origin–destination matrices within the framework of the interval concept for forming transport demand for urban public transport trips, using a stepwise method for generating passenger OD-matrices.



© Цинь С., Є. В. Любий, 2026

Стаття поширюється на умовах відкритої ліцензії CC BY 4.0

The scientific novelty of the research lies in improving the approach to forming passenger OD-matrices by applying a stepwise random generation method that ensures guaranteed compliance with a system of basic and additional constraints, including the capacities of transport zones for passenger departures and arrivals, as well as the population settlement curve. This makes it possible to significantly narrow the search interval of possible transport demand states.

The research results include the generation of a set of random passenger OD-matrices for the transport demand model of the Kharkiv city, their interval-based evaluation using indicators of transport work and average trip length, and the identification of the most probable states of the correspondence matrices. It has been established that the use of the stepwise generation method provides a substantial reduction in the range of possible values of the evaluation parameters compared with traditional approaches and extreme matrix variants, thereby increasing the reliability of transport demand modeling results.

The conclusions indicate that the application of the stepwise method for generating passenger OD-matrices improves the accuracy, stability, and predictive reliability of transport demand models within the interval concept, ensures a more realistic reproduction of passenger travel patterns, and provides a robust foundation for substantiating management decisions in the planning and development of urban public transport systems.

Key words: public transport, interval concept, passenger OD-matrix, modeling, transport demand.

Постановка проблеми

Одним із найбільш складних етапів у процесі формування транспортних моделей систем міського громадського транспорту (ГТ), як з методичної, так і з практичної точки зору, є розробка моделей транспортного попиту, найпоширенішою формою представлення яких є матриця пасажирських кореспонденцій (МПК). З огляду на це пошук найбільш ймовірних станів МПК є одним із пріоритетних завдань фахівців з транспортного моделювання та планування [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні, у переважній більшості випадків, це завдання – моделювання МПК – розв’язується шляхом застосування найуживаніших синтетичних методів розрахунку кореспонденцій, зокрема гравітаційної та ентропійної моделей, які базуються на результатах натурних спостережень за роботою міського ГТ.

З урахуванням недоліків синтетичних методів розрахунку МПК, а також складнощів отримання повної, надійної та об’єктивної інформації про існуючий або потенційний попит на пересування пасажирів міським ГТ у межах польових досліджень, можна стверджувати, що формування МПК для великого міста є надзвичайно складною, а в окремих випадках – практично нерозв’язною задачею. До цього слід також додати обмежену придатність результатів моделювання МПК із використанням синтетичних моделей у межах інтервальної концепції (ІК) моделювання транспортного попиту на пересування ГТ, що зумовлено лімітованою кількістю можливих станів матриць, що можуть бути згенеровані у межах таких моделей [1].

Але слід зазначити, що на сьогодні вже існують інструменти, які дозволяють навіть для окремого варіанта МПК, що описує певний стан транспортного попиту на пересування пасажирів ГТ в місті, сформувати такий її варіант, який відповідатиме параметрам, використаним для калібрування вихідного варіанта матриці кореспонденцій (МК). Одним із таких інструментів є вбудований у PTV VISUM модуль TFlowFuzzy [3], який забезпечує можливість калібрування як фрагменту МПК, так й повного її варіанту. Його застосування найчастіше ґрунтується на заданні калібрувальних обмежень або системи обмежень, що реалізуються через параметри ланок у транспортній моделі, які з’єднують вузли транспортної мережі, зокрема пасажиропотоки на ключових ділянках маршрутної мережі, або ж через результати функціонування системи маршрутів ГТ – обсяги перевезення пасажирів.

Також слід розуміти, що для отримання якісних результатів калібрування МПК із використанням модуля TFlowFuzzy необхідним є проведення польових досліджень за роботою ГТ, нехай може й не таких трудомістких, як у випадку формування стартового стану МПК, але у достатньому обсязі для актуалізації даних про попит на пересування пасажирів у місті. Зокрема, дані про фактичні пасажиропотоки на ключових ділянках маршрутної мережі можуть бути отримані шляхом організації відеоспостереження за рухом маршрутних транспортних засобів. Крім того, слід враховувати необхідність доступу до спеціалізованого програмного забезпечення з транспортного моделювання PTV VISUM, досвід використання якого українськими фахівцями у відповідній галузі наразі є обмеженим. Це зумовлено, по-перше, високою вартістю програмного продукту, а по-друге, відсутністю відкритих навчальних матеріалів і систематизованих практичних прикладів його застосування в умовах вітчизняних транспортних і маршрутних систем.

Все вище наведене свідчить про актуальність проведення наукових і практичних досліджень, спрямованих на удосконалення методів формування МПК з урахуванням специфіки функціонування міського ГТ, особливостей поведінки пасажирів і випадкового характеру транспортного попиту. Особливу увагу слід приділяти саме розробці та впровадженню комплексних підходів, які поєднують результати натурних обстежень роботи ГТ із сучасними методами математичного моделювання. Це дозволить підвищити точність і надійність транспортних моделей, а також забезпечити обґрунтованість управлінських рішень у сфері планування та розвитку систем міського ГТ [1].

Використання методів математичного моделювання для розв'язання задачі моделювання випадкових станів МПК у межах реалізації ІК формування моделей транспортного попиту на пересування пасажирів ГТ є обов'язковою вимогою. Це зумовлено необхідністю генерації великої кількості станів МК за умов обмежених часових ресурсів, відведених на виконання запланованих робіт з удосконалення систем міського ГТ. Одним із таких методів, побудованих на принципах математичного моделювання та використанні даних про місткість ТР з відправлення й прибуття пасажирів, є базовий власне випадковий метод генерації МПК [4]. Водночас результати його застосування, особливо з урахуванням накладання додаткових обмежень, не гарантують отримання коректного або прийнятного результату моделювання МПК, зокрема для об'єктів великої розмірності, незважаючи на те, що сформовані МПК характеризуються максимальною випадковістю [2].

Розроблений авторами цієї статті у [2] метод поетапної генерації випадкових станів МПК усуває недоліки, при-
таманні як синтетичним методам формування МК, так і власне базовому випадковому методу. Запропонований підхід спрямований на отримання гарантованого результату моделювання випадкових МПК, які відповідатимуть заданому переліку обмежень при генерації МК і можуть бути використані для оцінювання можливих станів транспортного попиту в межах ІК моделювання потреб населення у пересуванні ГТ.

Формулювання мети дослідження

Основною метою даної статті є оцінювання результатів моделювання випадкових МПК із застосуванням методу поетапної генерації МК у межах ІК моделювання транспортного попиту на пересування пасажирів ГТ.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для врахування повного переліку обмежень на генерацію МПК із застосуванням поетапного методу генерації МК за об'єкт експериментальних досліджень обрано модель транспортного попиту для м. Харкова, яка формувалася на основі даних, отриманих за рахунок проведення натурних спостережень за роботою ГТ [5]. У цій роботі авторами отримано фактичну криву розселення населення м. Харкова (додаткові обмеження) на основі результатів обстеження відстаней трудових пересувань мешканців міста. У свою чергу, інформацію про місткості транспортних районів (ТР) з відправлення і прибуття пасажирів м. Харкова – базові обмеження – можна отримати з роботи [6]. Інформація про місткості ТР з прибуття пасажирів для формування МПК у [6] була отримана шляхом обробки статистичної інформації про кількість працюючих на підприємствах з прив'язкою до території міста, яка, входить до відповідного ТР. У свою чергу, місткості ТР з відправлення розраховувалися з урахуванням щільності мешканців і місць прикладання праці, що закріплені за територіями відповідних ТР.

На наступному етапі генерації випадкових МПК поетапним методом було підібрано значення керуючих параметрів для роботи алгоритму за умов отримання десяти разового позитивного результату генерації МПК для певного значення максимально допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні у комірку матриці та мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень.

Слід відзначити, що позитивним результатом вважатиметься така модель транспортного попиту, при формуванні якої виконані всі обмеження, тобто залишок незаповнених кореспонденцій дорівнює 0 %. Але слід враховувати і той факт, що у процесі генерації МПК, можуть бути отримані такі стани моделей транспортного попиту, в яких залишок нерозподілених кореспонденцій буде зовсім незначним. Тому для пом'якшення вимог до генерації МК прийнятним результатом можна вважати такий, якщо залишок нерозподілених кореспонденцій у згенерованій МК не буде перевищувати 0,25 % від загальної кількості (суми) пересувань у матриці. Але слід взяти до уваги, що більш значущою при виникненні таких ситуацій є вимога щодо виконання конкретного обмеження (наприклад, обсягу пересувань у межах певної кишені). До цього слід також додати, що у процесі генерації МК можуть виникати ситуації, коли залишок нерозподілених кореспонденцій буде відноситися до двох і більше кишень додаткових обмежень. Тому за умов появи таких випадків при генерації МК, отримані результати не вважатимуться успішними.

З урахуванням вище наведених міркувань було отримано 170 варіантів випадкових МПК із застосуванням поетапного методу генерації МК.

Ключовим показником, що використовується для оцінювання станів розрахункових МПК у рамках ІК моделювання транспортного попиту є різниця у транспортній роботі по реалізації МК, яка найчастіше доповнюється показником середньої відстані пересування пасажирів у ГТ [5–7]

$$\bar{l} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} \cdot l_{ij}}{Q}, \quad (1)$$

де h_{ij} – величина пасажирської кореспонденції між ТР i та j , пас.; l_{ij} – відстань пересування пасажирів у ГТ між ТР i та j , км; Q – загальний обсяг пересувань пасажирів у МПК, пас.

З огляду на значення обраних для оцінювання показників існує можливість не лише отримати відповідні інтервали їх можливих станів, забезпечивши таким чином інтервальну оцінку параметрів пересування пасажирів, а й оцінити ефективність функціонування чинних міських пасажирських маршрутних систем і запропонованих заходів щодо їх коригування й удосконалення.

З метою здійснення розрахунків обраних для оцінювання згенерованих МПК було використано матрицю відстаней між ТР, яка є однією із характеристик моделі транспортної пропозиції системи ГТ м. Харкова, розрахованою з використанням спеціалізованого програмного забезпечення для транспортного моделювання PTV VISUM у рамках виконання дисертаційного дослідження [5].

За результатами проведених розрахунків було встановлено інтервали їх найбільш ймовірних значень (табл. 1), а також побудовано графік зміни величини середньої відстані пересування пасажирів у ГТ в залежності від значень транспортної роботи з реалізації відповідних МПК (рис. 1).

Таблиця 1

Результати інтервального оцінювання варіантів МПК, розроблених з використанням поетапного методу генерації МК

Показник	Величина інтервалу
Інтервал ймовірних значень	
Транспортна робота з реалізації з МПК, пас.-км	[3773156,2;3957719,7]
Середня відстань пересування пасажирів у ГТ, км	[8,633;9,057]
Інтервал найбільш ймовірних значень	
Транспортна робота з реалізації з МПК, пас.-км	[3904482,8;3916649,9]
Середня відстань пересування пасажирів у ГТ, км	[8,931;8,959]

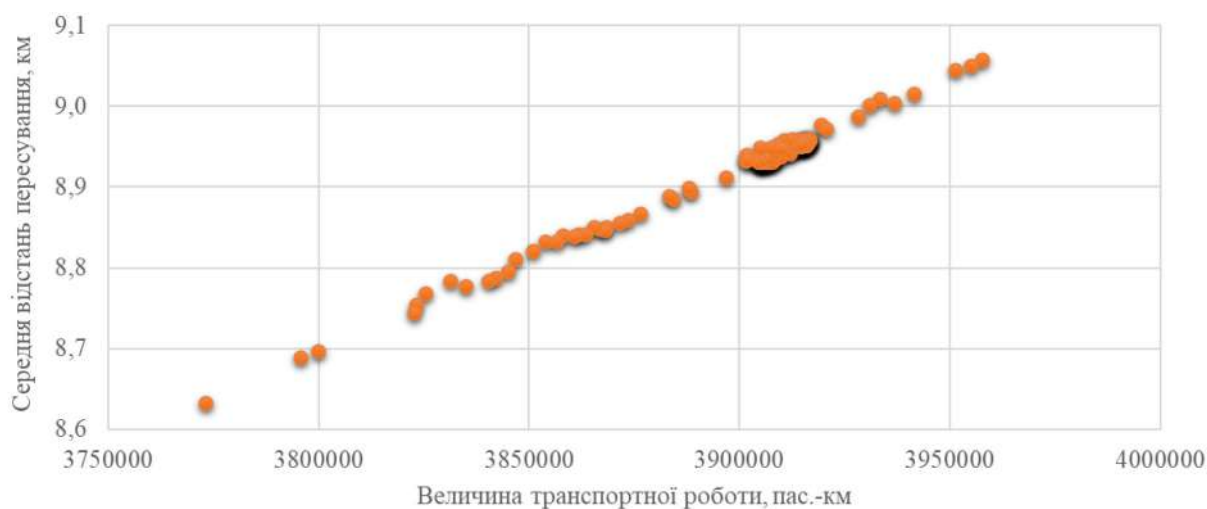


Рис. 1. Залежність середньої відстані пересування пасажирів у ГТ від транспортної роботи з реалізації МПК, згенерованих з використанням поетапного методу формування МК

Побудований графік дав змогу встановити, що 76 % (129 од.) згенерованих МПК належать до діапазону значень транспортної роботи [3904482,8;3916649,9] пас.-км (виділеного на рис. 1). Отже, варіанти МПК, що потрапляють у зазначений діапазон, можна вважати найбільш ймовірними.

Слід відзначити, що обрані оцінні показники з аналогічною метою використовувалися у роботах [5, 6] на тому ж самому об'єкті експериментальних досліджень, що і в даній статті. У роботі [6] було встановлено, що величина транспортної роботи з реалізації МКП для м. Харкова знаходиться в інтервалі [3586867,5;3993076,5] пас.-км, а середньої відстані пересування пасажирів у ГТ – [8,22;9,12] км. У свою чергу в роботі [5] визначено, що інтервали значень транспортної роботи з реалізації розроблених МК для м. Харкова і середньої відстані пересування пасажирів у ГТ становлять [3823170;3837292] пас.-км та [8,744;8,777] км, відповідно.

Ці дані слід розширити інформацією про екстремальні значення діапазонів обраних параметрів для оцінювання станів згенерованих МПК, які у рамках даного дослідження розраховані з використанням можливостей безкоштовної надбудови для MS Excel OpenSolver – було сформовано мінімальний і максимальний варіанти МПК для м. Харкова розміром 140×140 ТР. Тут за основу вхідну інформацію використано матрицю відстаней між ТР [5] та місткості ТР з відправлення та прибуття пасажирів [6]. У результаті розрахунків встановлено, що екстремальні значення можливого діапазону станів МПК для м. Харкова становитимуть: величина транспортної роботи з реалізації МК [919240,9;7599700,6] і середньої відстані пересування пасажирів у ГТ – [2,102;17,382].

З огляду на вище наведені значення оцінних показників, аналогічних показників представлених у роботах [5, 6], а також розрахованих для згенерованих МПК за поетапним методом формування моделей транспортного

попиту на пересування пасажирів ГТ, цілком можна стверджувати, що довжини діапазонів цих параметрів зменшується:

- для повного (екстремального) діапазону значень – транспортна робота у 549,1 разів або 99,8 %, середня відстань пересування пасажирів у ГТ – у 545,7 разів або 99,7 %;
- для діапазону значень оцінних показників, представлених у роботі [6] – транспортна робота у 33,1 рази або на 97,0 %, середня відстань пересування пасажирів у ГТ – у 32,1 рази або на 96,9 %;
- для діапазону значень оцінних показників, представлених у роботі [5] – транспортна робота у 1,16 разів або на 13,8 %, середня відстань пересування пасажирів у ГТ – у 1,18 разів або на 15,2 %.

Можливим поясненням такого суттєвого звуження інтервалу можливих станів МПК, яке визначається різницею обраних оцінних параметрів, є те, що при генерації МПК поетапним методом враховано додаткове обмеження, яке описує криву розселення населення м. Харкова і представляється у вигляді відповідної кількості кишень із заданим обсягом пересувань, що реалізуються на відповідну відстань. Графічна інтерпретація звуження меж можливих станів МПК представлена на рис. 2.

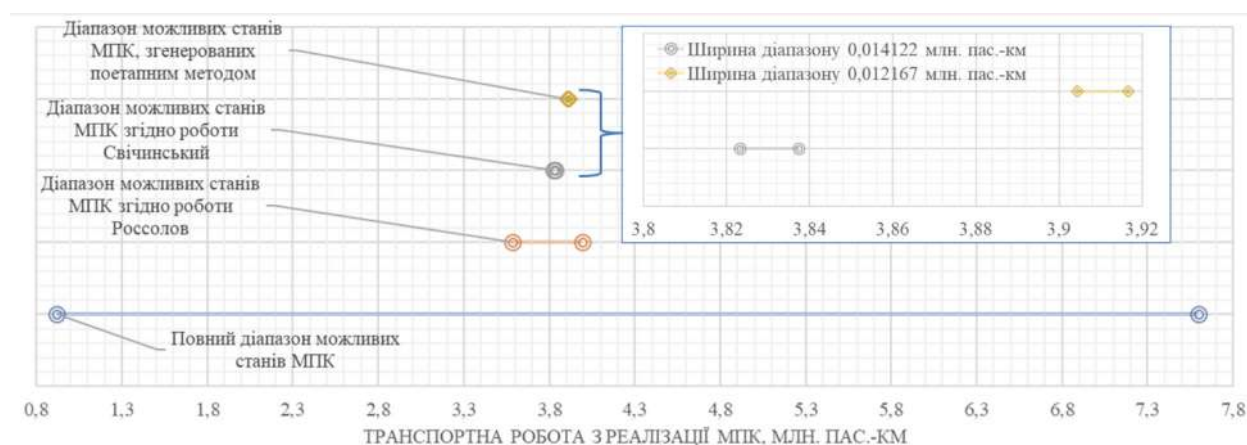


Рис. 2. Графічне відображення звуження меж діапазону зміни найбільш ймовірних станів МПК

Висновки

Отримані в статті результати підтверджують здатність поетапного методу генерації МПК підвищувати точність, стабільність та прогностну надійність результатів формування моделей транспортного попиту у межах ІК.

У роботі зроблено лише першу спробу щодо опису і врахування максимального переліку можливих обмежень на моделювання МПК, а також підбору значень керуючих параметрів, використання яких теоретично дозволило б отримати ще кращі результати генерації МПК за розробленим поетапним методом, і, відповідно, ще звужити межі найбільш ймовірних станів МК у рамках ІК моделювання потреб населення у пересуваннях ГТ.

Список використаної літератури

1. Цинь С., Любий Є.В. Аналіз існуючих методів формування моделей потреб пасажирів у пересуваннях. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. 11(42), ч. 2. С. 394-409. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.394-409](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.394-409)
2. Цинь Сяосюань, Любий Є.В. Теоретичні засади побудови алгоритму гарантованої генерації випадкових матриць пасажирських кореспонденцій. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. 12(43), ч. II. С. 295-303. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.295-303](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.295-303)
3. PTV Visum 2023 Manual. Karlsruhe: PTV Planung Transport Verkehr GmbH, 2022. 2773 p.
4. Івахнік В. С. Новий метод реалізації інтервальної концепції моделювання транспортного попиту. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. 6. С. 57–64. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-57-64>
5. Горбачов П. Ф., Свічинський С. В. Інтервальне моделювання потреб населення міст у перевезеннях громадським транспортом на основі функції розселення : монографія. Харків, 2016. 148 с.
6. Россолов О. В. Удосконалення інтервальної концепції визначення попиту на послуги пасажирського маршрутного транспорту в великих містах : автореф. дис. здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2012. 21 с.
7. Любий Є. В. Визначення попиту на пересування населення малих міст маршрутним пасажирським транспортом : автореф. дис. здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2012. 22 с.

References

1. Qin, X., & Liubiyi, Ye. (2025). Analysis of existing methods of forming models of passenger travel needs. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11(42), Part 2, 394-409. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.394-409](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.394-409).
2. Qin, X., & Liubiyi, Ye. (2025). Theoretical Foundations for the Development of an Algorithm for Guaranteed Generation of Random Passenger Correspondence Matrices. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 12(43), Part 2, 295-303. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.295-303](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.295-303)
3. PTV Visum 2023 Manual. (2022). Karlsruhe : PTV Planung Transport Verkehr GmbH.
4. Ivakhnik, V. S. (2022). A New Method for Implementing the Interval Concept of Transport Demand Modelling. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 6, 57–64. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-57-64>
5. Horbachov, P. F., Svichynskyi, S. V. (2016). Interval modeling of urban population demand for public transport based on the settlement function : monograph. Kharkiv : KhNAHU. [in Ukrainian].
6. Rossolov, O. V. (2012). Improving the interval concept for determining demand for passenger route transport services in large cities : avtoref. dys. kand. tekhn. nauk : 05.22.01. Kharkiv : KhNAHU. [in Ukrainian].
7. Liubiyi, Ye. V. (2012). Determining the demand for passenger route transport in small towns : avtoref. dys. kand. tekhn. nauk : 05.22.01. Kharkiv : KhNAHU. [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 11.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

О. О. ЧУПРИНІН

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри міцності літальних апаратів

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

ORCID: 0000-0002-8757-559X

СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ АНАЛІЗІ ТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ ЦИЛІНДРИЧНИХ АНГАРІВ РІЗНОЇ ДОВЖИНИ

Розглянуто цілі та завдання досліджень повзучості та тривалої міцності захисних будівельних конструкцій для авіаційної техніки, виконаних з алюмінієвого сплаву, показано актуальність таких досліджень. Описано модель нелінійного деформування тонкостінних елементів при короткочасному та тривалому навантаженні, методику проведення розрахунків. Що дозволяє визначати несучу здатність та тривалу міцність захисних елементів на основі запропонованого варіаційного функціоналу. Розглядається накопичення незворотних деформацій повзучості та пов'язаний із цим процес деградації матеріалу. Наведено приклад розрахунків конструкції покриття та надано рекомендації щодо раціонального обрису циліндричної панелі ангару. Велика кількість накопичених матеріалів випробувань на повзучість дозволяє здійснити оцінку існуючих та нових моделей деформування, проводити калібрування та підбирати відповідні постійні у рівняннях повзучості та руйнування. Варіаційна постановка задачі необхідна для побудови рівнянь скінчених елементів. Використовується принцип типу Лагранжа, в якому варіаційний функціонал задається на переміщеннях. У задачах теорії повзучості варіаційне рівняння включає додаткові сили та моменти від незворотних деформацій повзучості. У довільний момент часу деформації повзучості приймаються відомими (їх варіації дорівнюють нулю), тому функції переміщення оболонок в даний момент часу відповідають додатковим значенням сили та моменту та будуть розв'язком варіаційного рівняння. Отримані дані використовуються для структуризації рівнянь стану математичних моделей. Використано метод для випадку повзучого згину в кінцевих оболонках. З урахуванням того, що велика кількість захисних будівельних конструкцій відповідають моделям тонкостінних тіл – пластин та оболонок. Такі конструкції повинні мати необхідну міцність і жорсткість. Таким чином, удосконалення конструкцій елементів складної форми є одним з пріоритетних практичних завдань при проектуванні захисних споруд.

Ключові слова: повзучість, ушкоджувальність, тривала міцність, залізобетонна конструкція, циліндрична панель, метод скінчених елементів.

О. О. CHUPRYNIN

PhD, Associate Professor,

Associate Professor at the Department of Aircraft Strength

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"

ORCID: 0000-0002-8757-559X

FINITE ELEMENT MODELING IN ANALYSIS OF LONG-TERM STRENGTH OF CYLINDRICAL HANGARS OF VARIOUS LENGTHS

The goals and objectives of research on creep and long-term strength of protective building structures for aviation equipment made of aluminum alloy are considered, the relevance of such research is shown. The model of nonlinear deformation of thin-walled elements under short-term and long-term loading, the calculation method are described. What allows determining the bearing capacity and long-term strength of protective structures. The implementation of the proposed model under long-term deformation by the finite element method based on the proposed variational functional is presented. The accumulation of irreversible creep deformations and the related process of material degradation are considered. An example of calculations of the coating structure is given and recommendations are given for the rational outline of the cylindrical panel of the hangar. A large number of accumulated creep test materials allows evaluating existing and new deformation models, performing calibrations and selecting appropriate constants in the creep and fracture equations. The obtained data are used to structure the equations of state of mathematical models. The variational formulation of the problem is necessary for constructing finite element equations. The Lagrange-type principle is used, in which the variational functional is given on the displacements. In problems of creep theory, the variational equation includes additional forces and moments from irreversible creep deformations. At an arbitrary moment in time, the creep deformations are taken as known (their variations are zero), therefore, the shell displacement functions at a given moment in time correspond to the additional values of the force and moment and will be the solution



© О. О. Чупринін, 2026

Стаття поширюється на умовах відкритої ліцензії CC BY 4.0

of the variational equation. The method was used for the case of creep bending in conical shells. Given that a large number of protective building structures correspond to models of thin-walled bodies – plates and shells. Such structures must have the necessary strength and rigidity. Thus, improving the structures of elements of complex shape is one of the priority practical tasks in the design of protective structures.

Key words: creep, damage, long-term strength, reinforced concrete structure, cylindrical panel, finite element method.

Постановка проблеми

У роботі досліджується довільна тонка оболонка обертання при несиметричному напружено деформованому стані в умовах накопичення деформацій повзучості. Використовується рівняння теорії оболонок. У скінченоеlementній постановці введені відповідні вектори для опису напружено деформованого стану. Використовуючи прийняті припущення та відповідні рівняння, деформації довільної точки тіла виражені через деформації її середньої поверхні та введений вектор, визначений у точках серединної поверхні оболонки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

З урахуванням особливостей компоненти сил та моментів на одиницю довжини від складових пружних деформацій, зміни обсягу та повзучості визначаються наступним чином [1]: $N_{ij}^{(C)}$, $N_{ij}^{(V)}$ це складові мембранних зусиль, які викликані незворотними деформаціями повзучості та зміни обсягу в матеріалі відповідно; $M_{ij}^{(C)}$ і $M_{ij}^{(V)}$ відповідають повзучості та зміни обсягу наведених до серединної поверхні моментів [2]. Уявимо об'ємну деформацію у вигляді:

$$\varepsilon_{kl}^{(V)} = \varepsilon_{kl}^{(T)} = \alpha_{ij} \Delta T. \quad (1)$$

Конкретизацію діаграми можна отримати у вигляді інкрементальної теорії з урахуванням накопиченої ушкодженості [1]:

$$\dot{c} = B \frac{(\sigma)^n}{(1-\omega)^k}; \quad \dot{\omega} = D \frac{(\sigma)^m}{(1-\omega)^l}, \quad (2)$$

де $c(t)$ – незворотні деформації повзучості; $\omega(t)$ – параметр пошкодження; B, D, n, k, r, l – константи, що описують поведінку ізотропного матеріалу при тривалому навантаженні.

Застосуємо відомий метод [3] з теорії варіаційних рівнянь [1], що встановлює еквівалентність між операторним рівнянням $R\bar{u} = \bar{f}$ та варіаційне рівняння $(R\bar{u}, \bar{v})_H - (\bar{f}, \bar{v}) = 0$, де $\bar{u} \in D(R)$, $\bar{v} \in V'$, V' щільний у H . У випадку симетричного та позитивного оператора R , варіаційний функціонал збігається з функціоналом енергії:

$$F(\bar{u}) = (R\bar{u}, \bar{u})_H - (\bar{f}, \bar{u}) = 2 \int_V W(\bar{u}) dV - \int_S \bar{f} \bar{u} dS,$$

де $(R\bar{u}, \bar{u})$ є звичайним скалярним добутком, $F(\bar{u})$ є лінійним функціоналом, і $W(\bar{u})$ – питома потенційна енергія деформації твердого тіла. Нехай $u(u, v, w)^T$ бути вектором переміщення у «відомій» точці $N_{ij}^{(T)}$, $N_{ij}^{(C)}$, $M_{ij}^{(T)}$, $M_{ij}^{(C)}$. Крім того, $u^{(0)}$ – вектор кінематично допустимих віртуальних переміщень, тобто функцій переміщень, що задовольняють геометричні рівняння.

Формулювання мети дослідження

Отримання скінченоеlementної моделі деформування тонкостінних циліндричних моделей на основі відповідного функціоналу в умовах накопичення деформацій повзучості. І аналіз довговічності захисних споруд аерокосмічної техніки.

Викладення основного матеріалу дослідження

Множачи рівняння рівноваги типу [2] (без сил інерції) на відповідні компоненти вектора $\bar{u} = (u^{(0)} - u)$, підсумовуючи та інтегруючи їх на поверхні оболонки, отримуємо:

$$\begin{aligned} & \int_S \left[\left(N_{xx,x} + \frac{1}{r} N_{x0,0} - \frac{\cos \alpha}{r} N_{00} \right) (u^{(0)} - u) + \right. \\ & + \left(N_{0x,x} + \frac{1}{r} N_{00,0} + \frac{\cos \alpha}{r} N_{x0} + \frac{\sin \alpha}{r} M_{0x,x} + \frac{\sin \alpha}{r^2} M_{00,0} + \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{r^2} M_{x0} \right) (v^{(0)} - v) + \\ & + \left(M_{xx,xx} + \frac{1}{r} M_{x0,x0} - \frac{\cos \alpha}{r} M_{00,x} + \frac{1}{r} M_{0x,x0} + \frac{1}{r^2} M_{00,00} + \frac{\cos \alpha}{r^2} M_{x0,0} - \frac{\sin \alpha}{r} N_{00} + \right. \\ & \left. + \left(N_{xx} \frac{\partial w}{\partial x} \right)_{,x} + \frac{1}{r} \left(N_{x0} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)_{,x} + \frac{1}{r} \left(N_{0x} \frac{\partial w}{\partial x} \right)_{,0} + \frac{1}{r^2} \left(N_{00} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)_{,0} \right] (w^{(0)} - w) + p(w^{(0)} - w) \Big] dS = 0. \end{aligned}$$

Введемо позначення $(u^{(0)} - u) = \delta u$, $(v^{(0)} - v) = \delta v$, $(w^{(0)} - w) = \delta w$ і перетворимо це рівняння за допомогою формул Гріна [3]. Ми припускаємо, що граничні умови мають вигляд затиснутого, вільно опертого або вільного краю, для яких контурні інтеграли дорівнюють нулю. Тоді, з умови симетрії, $N_{x0} = N_{0x}$, $M_{x0} = M_{0x}$, це рівняння набуває вигляду:

$$\int_S \left[N_{xx} \left(-\delta u_{,x} - \frac{1}{2} \delta w_{,x}^2 \right) + N_{\theta\theta} \left(-\frac{1}{r} \delta v_{,\theta} - \frac{\cos \alpha}{r} \delta u - \frac{\sin \alpha}{r} \delta w - \frac{1}{2r^2} \delta w_{,\theta}^2 \right) + \right. \\ \left. + N_{x\theta} \left(-\frac{1}{r} \delta u_{,\theta} - \delta v_{,x} + \frac{\cos \alpha}{r} \delta v - \frac{1}{r} \delta(w_{,x} w_{,\theta}) \right) + M_{xx} (\delta w_{,xx}) + M_{\theta\theta} \left(-\frac{\cos \alpha}{r} \delta w_{,x} - \frac{1}{r^2} \delta w_{,\theta\theta} - \frac{\sin \alpha}{r^2} \delta v_{,\theta} \right) + \right. \\ \left. + M_{x\theta} \left(\frac{2}{r} \delta w_{,x\theta} - \frac{\cos \alpha}{r^2} \delta w_{,\theta} - \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{r} \delta v - \frac{\sin \alpha}{r} \delta v_{,x} \right) \right] dS + \int_S p \delta w dS = 0.$$

З урахуванням геометричних співвідношень [2], отримуємо ($i, j = x, \theta$):

$$-\int_S (N_{ij} \cdot \delta \varepsilon_{ij}^{[0]} - M_{ij} \cdot \delta k_{ij}) dS + \int_S p \cdot \delta w dS = 0. \quad (3)$$

Зрештою, підставляючи вирази з фізичних рівнянь [2], ми можемо переписати (3) у такому вигляді ($i, j = x, \theta$; $k, l = x, \theta$):

$$\int_S (b_{ijkl} \varepsilon_{ij}^{[0]} \delta \varepsilon_{kl}^{[0]} - d_{ijkl} k_{ij} \delta k_{kl}) dS - \int_S p \cdot \delta w dS - \int_S (N_{ij}^{(V)} + N_{ij}^{(C)}) \delta \varepsilon_{ij}^{[0]} dS + \int_S (M_{ij}^{(V)} + M_{ij}^{(C)}) \delta k_{ij} dS = 0. \quad (4)$$

Отже, алгоритм розв'язання задач повзучості в конічних оболонках обертання у випадку несиметричного навантаження можна представити такими кроками. У довільний момент часу сили та моменти, що залежать від об'ємних деформацій та деформацій повзучості ($N_{ij}^{(V)}$, $N_{ij}^{(C)}$, $M_{ij}^{(V)}$, $M_{ij}^{(C)}$) визначаються числовим інтегруванням через товщину оболонки.

Перший інтеграл у рівнянні (4) має квадратичну форму, що дозволяє нам визначити $u_{(k)}$ як точку функціонального мінімуму прямим методом для розв'язків варіаційних задач. Представимо алгоритм скінченно-елементного моделювання (МСЕ) з використанням векторно-матричного представлення [4]. Використовуючи рівняння (2). Зв'язок між напруженнями та деформаціями визначається рівнянням (4):

$$\underline{\sigma} = \underline{E} \underline{\varepsilon} + \underline{\sigma}^{(n)} - \underline{\sigma}^{(V)} - \underline{\sigma}^{(C)}, \quad (5)$$

де $\underline{\sigma}^{(V)} = (N_{xx}^{(V)}, N_{\theta\theta}^{(V)}, N_{x\theta}^{(V)}, M_{xx}^{(V)}, M_{\theta\theta}^{(V)}, M_{x\theta}^{(V)})^T$ – вектор сил, що виникають внаслідок об'ємних деформацій, а $\underline{E}$ – матриця пружних властивостей. Введемо вектори додаткових сил від деформації повзучості та нелінійної складової пружної деформації: $\underline{\sigma}^{(C)} = (N_{xx}^{(C)}, N_{\theta\theta}^{(C)}, N_{x\theta}^{(C)}, M_{xx}^{(C)}, M_{\theta\theta}^{(C)}, M_{x\theta}^{(C)})^T$; $\underline{\sigma}^{(n)} = (N_{xx}^{(n)}, N_{\theta\theta}^{(n)}, N_{x\theta}^{(n)}, 0, 0, 0)^T$.

У довільний момент часу t , вектор напружень $\underline{\sigma}^{(z)}$ розраховується аналогічно до (5): $\underline{\sigma}^{(z)} = \underline{E}^z \underline{\varepsilon}^{(l)} + \underline{P}^{(z)} \cdot \underline{\varepsilon}^{(n)} - \underline{\sigma}^{(V)(z)} - \underline{P}^{(z)} \cdot \underline{c}$, де $-h/2 \leq z \leq h/2$ у нас є:

$$\underline{E}^{(z)} = \underline{P}^{(z)} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 & z & \nu z & 0 \\ \nu & 1 & 0 & \nu z & z & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad \underline{\sigma}^{(V)(z)} = \frac{E \varepsilon^{(V)}}{1-\nu} (1, 1, 0)^T.$$

Наведемо розв'язану остаточну форму рівнянь для конічного скінченного елемента [5]. Перетворення варіаційного функціоналу дає:

$$\delta J = \frac{1}{2} \int_S (\delta \underline{\varepsilon}^{(l)T} \cdot \underline{E} \cdot \delta \underline{\varepsilon}^{(l)} + \delta \underline{\varepsilon}^{(l)T} \cdot \underline{P}^{[0]} \cdot \underline{\varepsilon}^{[0](n)} - \delta \underline{\varepsilon}^{(l)T} \cdot \underline{P}^{[0]} \cdot \underline{c}^{[0]} - \delta \underline{\varepsilon}^{(l)T} \cdot \underline{\sigma}^{[0](V)}) dS - \\ - \int_S \left(\left(N_{xx} \frac{\partial w}{\partial x} \right)_{,x} + \frac{1}{r} \left(N_{x\theta} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)_{,x} + \frac{1}{r} \left(N_{x\theta} \frac{\partial w}{\partial x} \right)_{,\theta} + \frac{1}{r^2} \left(N_{\theta\theta} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)_{,\theta} \right) \delta w dS - \int_S \delta \underline{u}^T \cdot \underline{p} dS = 0. \quad (6)$$

Вище було показано, що для довільного моменту часу з відомими додатковими силами, викликаними деформаціями повзучості, задача зводиться до знаходження пружного розв'язку оболонки, навантаженої цими початковими та додатковими силами. Вся система рівнянь скінчених елементів виражається як:

$$[K] \{U\} = \{P^{(e)}\} + \{P^{(C)}\} + \{P^{(V)}\} + \{P^{(p)}\} + \{P^{(n)}\}, \quad (7)$$

де $[K]$ – глобальна матриця жорсткості; $\{U\}$ – вектор вузлових переміщень; $\{P^{(e)}\}$ – узагальнений вектор зовнішніх сил; $\{P^{(C)}\}$ – узагальнений вектор вузлових сил, спричинених незворотними деформаціями повзучості; $\{P^{(V)}\}$ – узагальнений вектор об'ємних сил; $\{P^{(p)}\}$ – узагальнений вектор вузлових сил, що виникають внаслідок проекцій

узагальнених сил на вектор нормалі; $\{P^{(n)}\}$ – узагальнений вектор вузлових сил, спричинених нелінійною складовою пружних деформацій.

Наведена модель та метод розрахунку використані для аналізу напруженого стану циліндричної панелі, яка є відкритою оболонкою, що деформується під дією власної ваги та, можливо, додатковим корисним навантаженням. Так, розглянемо, конструкцію завтовшки h зі стороною в поздовжньому напрямку ℓ і в поперечному b . У розрахунках варіювалася довжина покриття ℓ . Всі подальші розрахунки проводилися з наступним розбиттям на кінцеві елементи: 20 по довжині та 20 по колу.

Для такої панелі радіус кривизни в окружному напрямку дорівнює: $R = \frac{f}{2} + \frac{b^2}{8f}$, де f – стріла підйому, b – розмір у плані у поперечному напрямку. Що відповідає куту розкриття панелі, що визначається за формулою: $\alpha = 2 \arccos\left(1 - \frac{f}{R}\right)$.

Орієнтуючись на практичне застосування при проектуванні будівель та споруд, зручніше буде використання наведеної стріли підйому $\hat{f}$. Т. е., віднесеної до ширини покриття $\hat{f} = f/b$. Розглянемо вплив довжини оболонки на особливості його деформування та характеристик міцності. Розглядалася оболонка товщини $h = 5$ см (1/200 від розмірів у площині), виконана із алюмінієвого сплаву Д16АТ [6]. Для даного матеріалу при кімнатній температурі $T = 20$ °С фізико-механічні характеристики: модуль пружності [7] $E = 0,65 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$, масова щільність $\rho = 2,8 \cdot 10^3$ кг/м³. $B = 3,19 \cdot 10^{-17}$ МПа⁻ⁿ/год, $D = 1,76 \cdot 10^{-17}$ МПа⁻ⁿ/год, $n = m = 2,93$, $k = l = 1,38$.

Для панелі завдовжки $\ell = 1$ м встановлено, що найменша інтенсивність напруження буде в панелі, наведена стріла підйому якої дорівнює $\hat{f} = 0,309$. Крім того, розглядалася оболонка, довжиною $\ell = 5$ м з таким самим розбиттям (20 × 20). В даному випадку найменша інтенсивність напруги буде в панелі, наведена стріла підйому якої дорівнює $\hat{f} = 0,278$. Аналогічні розрахунки були проведені для оболонки завдовжки $\ell = 20$ м. Встановлено, що найменша інтенсивність напружень буде в панелі, наведена стріла підйому якої дорівнює $\hat{f} = 0,276$, що повністю збігається з оболонкою $\ell = 10$ м. Отримані результати розрахунків дозволяють стверджувати, що довжина покриття істотно не впливає на максимальну напругу в циліндричній панелі. І, отже, не сильно впливає на міцність та довговічність конструкцій, а також на вибір раціонального контуру. За певної довжини ($\ell \approx 0,65$ м) інтенсивність напруження з точністю до значущих цифр не змінюється зі збільшенням довжини. Так, зі збільшенням довжини спостерігається асимптотичне наближення раціональної стріли підйому до значення 0,276.

Рівень накопичення ушкоджуваності можна оцінити з величини інтенсивності напруження в початковий момент часу. Аналогічні результати отримано й у період експлуатації 100 років. Залежність раціональної стріли підйому від довжини оболонки наведено на рисунку 2 (крива 1). Подібні залежності спостерігаються і у випадку, коли панель сприймає корисне навантаження. Проаналізуємо деформування циліндричної панелі під дією власної ваги конструкції та вдесятеро більше за величину корисного навантаження $q = 10p$, де p – власну вагу оболонки на одиницю площі. У розрахунках також, як і для експлуатації тільки під власною вагою, варіювалася висота підйому f . Розглянемо циліндричну панель із розмірами 10 × 10 м ($\ell = 10$ м і $b = 10$ м), та завтовшки $h = 5$ см. Встановлено, що найменша інтенсивність напружень буде в панелі, відносна висота якої дорівнює $\hat{f} = 0,269$.

Розглядається миттєве деформування та зміна інтенсивності напружень через 10 та 100 років. Залежність раціональної стріли підйому від довжини оболонки наведено на рисунку 2 (крива 2). Також дослідження були проведені і для деформування панелі під дією власної ваги конструкції та корисного навантаження у двадцять разів більше за власну вагу $q = 20p$. Встановлено, що найменша інтенсивність напруги буде в панелі, відносна висота якої по асимптоті прагне $\hat{f} = 0,259$ зі збільшенням довжини. Залежність раціональної стріли підйому від довжини оболонки наведено на рисунку 2 (крива 3).

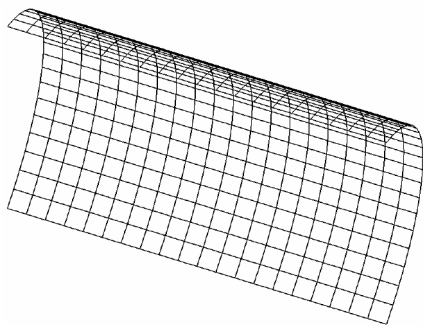


Рис. 1. СЕ представлення циліндричної панелі

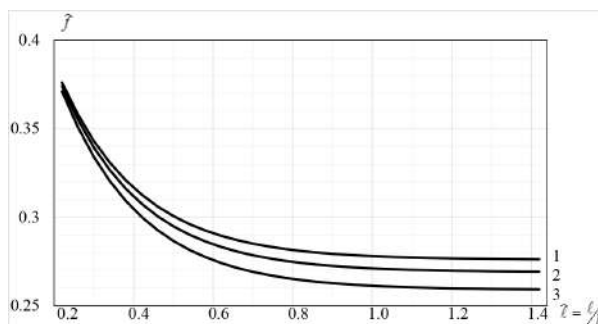


Рис 2. Залежність раціональної стріли підйому від довжини оболонки

Висновки

Показано, що отриманий, на основі запропонованої теоретичної моделі повзучості з ушкоджуваністю, метод розрахунку дозволяє проводити дослідження тонкостінних будівельних конструкцій, виконаних з різних матеріалів за різних умов експлуатації [8] з урахуванням повзучості. Це дає можливість проводити адекватний аналіз надійності та довговічності будівельних конструкцій, а також вибирати раціональне контур залізобетонних елементів та виробляти рекомендації проектувальникам.

Список використаної літератури

1. Breslavsky D., Chuprynin A, Morachkovsky O, Tatarinova O. and Pro W. (2019). Deformation and damage of nuclear power station fuel elements under cyclic loading / *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. Volume 54, Issue 5-6, 1 July 2019. 348-359.
2. Шутенко, Л. Н., Засядько, Н. А., & Чупринін, О. О. (2007). Основи теорії пружності та пластичності: навчальний посібник для студентів будівельних спеціальностей. *Харків : ХНАГХ*. 135 с.
3. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., and Wood D. D. (2014). *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Butterworth-Heinemann.
4. Herisanu, N., Marinca. V. A. (2021). Solution procedure combining analytical and numerical approaches to investigate a two-degree-of-freedom vibro-impact oscillator. *Mathematics*. 9(12), 1374.
5. Mao, XY., Zheng, HT., Ding, H. et al. (2024). An analytical method for nonlinear and nonhomogeneous boundary value problems of plates. *Nonlinear Dyn*, 112, 1691–1711.
6. Zhu, Z. et al. (2024). Design and Development of New Copper-Aluminum Composite Materials. *The Proceedings of the 19th Annual Conference of China Electrotechnical Society. ACCES 2024*. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1312.
7. Xinke Xiao, Qianqian Ma, Yifan Kong et al. (2025). An Experimental and Numerical Investigation on Enhancing the Ballistic Resistance of 316L Stainless Steel Plates Against Blunt Projectiles by Covering with 2024-T351 Aluminum Alloy Thin Plates. *Advancing Open Science*, 18(18), 4264.
8. Shpachuk V., Chuprynin A., Daleka V., Suprun T. (2020). “Simulation of impact interaction of rail transport carriage in a butt roughness zone”. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport* 106: 141–152.

References

1. Breslavsky D., Chuprynin A, Morachkovsky O, Tatarinova O. and Pro W. (2019). Deformation and damage of nuclear power station fuel elements under cyclic loading / *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. Volume 54, Issue 5–6, 1 July 2019. 348-359.
2. Shutenko, L. N., Zasyadko, N. A., & Chuprynin, A. A. (2007). Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity: student manual. *Kharkov : HNAGH*, 135 p. [in Ukrainian].
3. Zienkiewicz O. C., Taylor R.L., and Wood D.D. (2014). *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Butterworth-Heinemann.
4. Herisanu, N., Marinca. V. A. (2021). Solution procedure combining analytical and numerical approaches to investigate a two-degree-of-freedom vibro-impact oscillator. *Mathematics*. 9(12), 1374.
5. Mao, XY., Zheng, HT., Ding, H. et al. (2024). An analytical method for nonlinear and nonhomogeneous boundary value problems of plates. *Nonlinear Dyn*, 112, 1691–1711.
6. Zhu, Z. et al. (2024). Design and Development of New Copper-Aluminum Composite Materials. *The Proceedings of the 19th Annual Conference of China Electrotechnical Society. ACCES 2024*. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 1312.
7. Xinke Xiao, Qianqian Ma, Yifan Kong et al. (2025). An Experimental and Numerical Investigation on Enhancing the Ballistic Resistance of 316L Stainless Steel Plates Against Blunt Projectiles by Covering with 2024-T351 Aluminum Alloy Thin Plates. *Advancing Open Science*, 18(18), 4264.
8. Shpachuk V., Chuprynin A., Daleka V., Suprun T. (2020). “Simulation of impact interaction of rail transport carriage in a butt roughness zone”. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport* 106: 141–152.

Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

А. П. ШЕВЧЕНКО

доктор філософії за спеціальністю 271 «Річковий та морський транспорт»,
старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем
на водному транспорті

Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного
транспорту Національного транспортного університету»
ORCID: 0009-0003-5878-6771

І. В. ТРОФИМЕНКО

кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем
на водному транспорті

Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного
транспорту Національного транспортного університету»
ORCID: 000-0002-0919

Н. С. УРУМ

кандидат педагогічних наук, доцент,
в.о. завідувача кафедри природничо-математичних
та інженерно-технічних дисциплін

Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного
транспорту Національного транспортного університету»
ORCID: 0000-0003-2493-9314-2948

А. О. ТРОФИМЕНКО

доктор філософії за спеціальністю 271 «Річковий та морський транспорт»,
доцент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем
на водному транспорті

Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного
транспорту Національного транспортного університету»
ORCID: 0000-0001-8424-7518

ВПЛИВ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ НА МОРЕХІДНІСТЬ СУДНА: КРИТЕРІЇ БЕЗПЕКИ ТА АЛГОРИТМ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

У статті виконано комплексний аналіз впливу гідрометеорологічних умов на морехідність судна з позицій забезпечення безпеки мореплавства. Актуальність дослідження зумовлена тим, що, за даними Європейського агентства з морської безпеки, несприятливі погодні умови є сприяючим фактором значної частки морських аварій та інцидентів, при цьому людський елемент пов'язаний із понад 80 % розслідуваних випадків. Систематизовано основні гідрометеорологічні фактори, що впливають на морехідні якості судна: вітер, вітрове хвилювання, зиб, морські течії, обмежена видимість та обледеніння. Для кожного фактора визначено механізм впливу на параметри морехідності – остійність, качку, заливання палуби, слемінг та втрату швидкості. Проаналізовано п'ять режимів втрати остійності, визначених Тимчасовими настановами ІМО щодо критеріїв остійності другого покоління (MSC.1/Circ.1627): втрата остійності на хвилі, параметричний резонанс крену, серфінг та бродінг, надмірні прискорення та мертве судно. Виконано систематизацію критеріїв безпеки з документів ІМО (MSC.1/Circ.1228, IS Code 2008, MSC.1/Circ.1627) та розроблено алгоритм прийняття рішень вахтовим помічником капітана при погіршенні гідрометеорологічних умов у контексті управління ресурсами навігаційного містка). Запропоновано формалізовану матрицю оцінки навігаційного ризику, що інтегрує індекс метеорологічної небезпеки та індекс вразливості судна з визначенням чотирьох рівнів ризику та конкретних рекомендованих дій для кожного рівня. Окремо розглянуто специфіку гідрометеорологічних умов Чорноморського басейну, зокрема короткоперіодне хвилювання з крутими фронтами, явище бори та сезонність штормової діяльності. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення програм підготовки судноводіїв та розробки систем підтримки прийняття рішень на навігаційному містку.

Ключові слова: морехідність судна, гідрометеорологічні умови, остійність, критерії остійності другого покоління, управління ресурсами містка, оцінка ризику, алгоритм прийняття рішень, ІМО.



A. P. SHEVCHENKO

PhD in Specialty 271 “River and Maritime Transport”,
Senior Lecturer at the Department of Navigation and Operation
of Technical Systems in Water Transport
Separated Structural Unit “Danube Institute of Water Transport
of National Transport University”
ORCID: 0009-0003-5878-6771

I. V. TROFYMENKO

Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Navigation and Operation
of Technical Systems in Water Transport
Separated Structural Unit “Danube Institute of Water Transport
of National Transport University”
ORCID: 000-0002-0919-2948

N. S. URUM

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Acting Head of the Department of Natural Sciences, Mathematics
and Engineering Disciplines
Separated Structural Unit “Danube Institute of Water Transport
of National Transport University”
ORCID: 0000-0003-2493-9314

A. O. TROFYMENKO

PhD in Specialty 271 “River and Maritime Transport”,
Associate Professor at the Department of Navigation and Operation
of Technical Systems in Water Transport
Separated Structural Unit “Danube Institute of Water Transport
of National Transport University”
ORCID: 0000-0001-8424-7518

INFLUENCE OF HYDROMETEOROLOGICAL CONDITIONS ON SHIP SEAWORTHINESS: SAFETY CRITERIA AND DECISION-MAKING ALGORITHM

This article presents a comprehensive analysis of the influence of hydrometeorological conditions on ship seaworthiness from the perspective of ensuring navigation safety. The relevance of the research is determined by the fact that, according to the European Maritime Safety Agency (EMSA), adverse weather conditions are a contributing factor to a significant proportion of marine casualties and incidents, while the human element is associated with over 80 % of investigated cases. The main hydrometeorological factors affecting ship seaworthiness are systematised: wind, wind waves, swell, sea currents, restricted visibility and icing. For each factor, the mechanism of influence on seaworthiness parameters is identified – stability, rolling, deck wetness, slamming and speed loss. Five stability failure modes defined by the IMO Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria (MSC.1/Circ.1627) are analysed: pure loss of stability, parametric rolling, surf-riding/broaching, excessive acceleration and dead ship condition. A systematisation of safety criteria from IMO documents (MSC.1/Circ.1228, IS Code 2008, MSC.1/Circ.1627) is performed, and a decision-making algorithm for the officer of the watch under deteriorating hydrometeorological conditions is developed within the context of Bridge Resource Management (BRM). A formalised navigational risk assessment matrix is proposed, integrating the meteorological hazard index and the ship vulnerability index with four risk levels and specific recommended actions for each level. The specific hydrometeorological conditions of the Black Sea basin are separately considered, including short-period waves with steep fronts, the bora phenomenon and seasonal storm patterns. The results of the study can be used to improve seafarer training programmes and to develop decision support systems for the navigational bridge.

Key words: ship seaworthiness, hydrometeorological conditions, stability, second generation intact stability criteria, bridge resource management, risk assessment, decision-making algorithm, IMO.

Постановка проблеми

Безпека мореплавства значною мірою визначається здатністю судна зберігати морехідні якості в реальних гідрометеорологічних умовах. За даними Європейського агентства з морської безпеки (EMSA), протягом 2014–2023 років зареєстровано 26 595 морських аварій та інцидентів у водах Європейського Союзу, з яких людський елемент пов'язаний із 80,1 % розслідуваних випадків [1]. Значна частка цих аварій обумовлена неправильними діями екіпажу в складних погодних умовах: невчасною зміною курсу або швидкості, неврахуванням прогнозу погоди, помилками в оцінці остійності судна на хвилюванні.

Міжнародна морська організація (далі – ІМО) приділяє особливу увагу проблемі безпеки судна у несприятливих погодних умовах. Циркуляр MSC.1/Circ.1228 (2007) надає переглянуте керівництво капітану щодо уникнення небезпечних ситуацій у складних гідрометеорологічних умовах [2]. У 2020 році схвалено Тимчасові настанови щодо критеріїв остійності другого покоління (MSC.1/Circ.1627), що вперше формалізують оцінку п'яти динамічних режимів втрати остійності на хвилюванні [3]. Конвенція ПДНВ у редакції Манільських поправок (далі – STCW) включає вимоги до компетенцій з управління ресурсами містка (Bridge Resource Management, далі – BRM), що передбачають прийняття обґрунтованих рішень на основі всієї доступної інформації, включаючи метеорологічну [4].

Водночас залишається недостатньо систематизованим комплексний аналіз, який об'єднав би гідрометеорологічні фактори, їх вплив на конкретні параметри морехідності, сучасні критерії безпеки ІМО та алгоритм прийняття навігаційних рішень в єдину структуровану систему. Це визначає актуальність та практичну значущість дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вплив гідрометеорологічних умов на безпеку мореплавства досліджується в декількох напрямках. Фундаментальні питання остійності судна на хвилюванні висвітлено в роботах Faltinsen (1990) [5], де детально описано гідродинамічну взаємодію судна з хвилями, Rawson та Tupper (2001) [6], де розглянуто морехідні якості з позицій суднобудування.

Критерії остійності другого покоління, затверджені ІМО у формі MSC.1/Circ.1627, є результатом майже двадцятирічного міжнародного дослідження. Peters et al. (2022) надали детальний огляд цих критеріїв та їх практичне застосування [7]. Begovic et al. (2023) дослідили спрощені операційні настанови для запобігання параметричному крену на основі критеріїв другого покоління [8].

У контексті прийняття навігаційних рішень важливим є циркуляр ІМО MSC.1/Circ.1228, який визначає чотири основні небезпечні явища для судна на хвилюванні: серфінг та брочинг, параметричний крен, втрату остійності при проходженні гребеня хвилі та надмірні прискорення [2]. Практичне керівництво MAN Energy Solutions (2023) надає дані щодо втрати швидкості судна в залежності від стану моря та курсового кута хвилі [9].

Серед вітчизняних досліджень слід відзначити роботу Л. Л. Пліти та співавторів (2024) з питань організації ходової навігаційної вахти та прийняття рішень на навігаційному містку [10], а також дослідження Н. С. Урум та співавторів (2025) щодо ролі комунікативних навичок в системі управління ресурсами містка [11]. А. П. Шевченко та співавтори (2025) проаналізували проблеми підготовки моряків на тлі впровадження сучасних інформаційних технологій на морському транспорті [12].

Невирішені раніше частини загальної проблеми

Попри значний обсяг досліджень окремих аспектів проблеми, залишається несистематизованим комплексний аналіз, що пов'язує гідрометеорологічні фактори з конкретними параметрами морехідності та критеріями ІМО, а також відсутній формалізований алгоритм прийняття рішень вахтовим помічником, що інтегрує метеорологічну інформацію з оцінкою морехідності в контексті BRM.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є комплексний аналіз впливу гідрометеорологічних умов на морехідність судна та розробка алгоритму прийняття навігаційних рішень для забезпечення безпеки мореплавства. Для досягнення поставленої мети передбачено систематизувати основні гідрометеорологічні фактори та визначити характер їх впливу на параметри морехідності судна. Водночас проаналізовано критерії безпеки, закріплені у відповідних документах ІМО, що стало основою для розробки алгоритму прийняття рішень вахтовим помічником капітана при погіршенні гідрометеорологічної обстановки. Окрім того, запропоновано матрицю оцінки навігаційного ризику, призначену для підтримки обґрунтованих рішень щодо вибору курсу та швидкості в умовах несприятливої погоди.

Викладення основного матеріалу дослідження

Гідрометеорологічні умови впливають на морехідність судна через комплекс фізичних механізмів. Основними факторами є: вітер, вітрове хвилювання, зиб (мертва хвиля), морські течії, обмежена видимість (туман, опади) та обледеніння. Кожен фактор має специфічний механізм впливу на параметри морехідності.

Вітер створює аеродинамічний тиск на надводну частину судна, що спричиняє крен, дрейф та вітровий момент. Вітрова сила на надводну частину судна визначається залежністю [5]:

$$F_w = 0,5 \times \rho_a \times C_w \times A_L \times V_w^2, \quad (1)$$

де ρ_a – густина повітря (1,226 кг/м³ при стандартних умовах); C_w – аеродинамічний коефіцієнт (1,0–1,3 залежно від обводів надбудови); A_L – площа бокової парусності (м²); V_w – швидкість вітру відносно судна (м/с). Вітровий кренячий момент:

$$M_w = F_w \times z_w, \quad (2)$$

де z_w – плече вітрового тиску – вертикальна відстань від центру бокової парусності до центру бокового опору підводної частини корпусу. Критерій погоди (weather criterion) згідно з IS Code 2008 визначає мінімальне

співвідношення між площею діаграми відновлювальних моментів та площею під кривою кренячих моментів від вітру [13].

Хвилювання є найбільш суттєвим фактором впливу на морехідність. Параметри хвилювання визначаються швидкістю вітру, його тривалістю та розгоном (fetch). Значна висота хвиль H_s пов'язана зі швидкістю вітру емпіричною залежністю Шулейкіна [14]:

$$H_s = 0,022 \times V_w^2 \text{ (при повністю розвиненому хвилюванні)}, \quad (3)$$

де V_w – швидкість вітру на висоті 10 м (м/с). Період хвиль T_w та довжина хвилі λ пов'язані з глибоководним хвилюванням:

$$\lambda = (g \times T_w^2) / (2\pi) \approx 1,56 \times T_w^2, \quad (4)$$

де g – прискорення вільного падіння (9,81 м/с²). Період зустрічі з хвилею, що є ключовим параметром для оцінки небезпечних режимів, визначається:

$$T_e = T_w / |1 - (\omega_w \times V_s \times \cos \alpha) / g|, \quad (5)$$

де $\omega_w = 2\pi / T_w$ – кутова частота хвилі; V_s – швидкість судна; α – курсовий кут хвилі (0° – попутні хвилі, 180° – зустрічні). Для попутних та кормових хвиль T_e зростає і може наближатися до власного періоду крену судна T_ϕ , що створює умови для резонансу.

Таблиця 1

Гідрометеорологічні фактори та їх вплив на параметри морехідності

Фактор	Параметр морехідності	Механізм впливу	Критичні значення
Вітер	Остійність, дрейф	Аеродинамічний тиск на надбудову	≥ 7 балів за Бофортом (14–17 м/с)
Вітрове хвилювання	Качка, заливання, слемінг	Хвильове збудження, резонанс	$H_s \geq 4$ м, $T_e \approx T_\phi$
Зиб (swell)	Бортова качка, параметричний крен	Довгоперіодне хвильове збудження	$\lambda/L \approx 1,0\text{--}2,0$
Морські течії	Швидкість, керованість	Зміна відносної швидкості і курсу	$V_{течії} > 2$ вузлів
Обмежена видимість	Безпека навігації	Неможливість візуального спостереження	Видимість < 2 милі
Обледеніння	Остійність	Зростання ваги та зміщення ЦВ вгору	$T_{повітря} < -2$ °C, бризки

Тимчасові настанови IMO MSC.1/Circ.1627 (2020) визначають п'ять режимів динамічної втрати остійності на хвилюванні, що доповнюють класичні критерії IS Code 2008 [3]. На відміну від традиційних критеріїв, що оцінюють остійність у спокійній воді, критерії другого покоління враховують динамічну взаємодію судна з хвилями. Для кожного режиму передбачено трирівневу оцінку: Level 1 (спрощена перевірка), Level 2 (деталізована оцінка) та Direct Stability Assessment (пряме моделювання).

Чиста втрата остійності виникає, коли гребінь довгої хвилі знаходиться під міделем судна, а носова та кормова частини – над западинами. При цьому ватерлінія в середній частині розширюється, а в крайніх – звужується, що може призвести до суттєвого зменшення метацентричної висоти GM. Умова небезпеки:

$$\lambda \approx L_{pp} \text{ та } GM_{хвиля} < GM_{min}, \quad (6)$$

де L_{pp} – довжина судна між перпендикулярами; $GM_{хвиля}$ – метацентрична висота при проходженні гребеня хвилі; GM_{min} – мінімально допустиме значення. Цей режим найбільш небезпечний для суден із малим відношенням B/d (ширина/осадка) при попутному та кормово-четвертному хвилюванні [3].

Параметричний крен виникає при періодичній зміні відновлювального моменту внаслідок проходження хвиль уздовж корпусу. Резонанс має місце при:

$$T_e \approx T_\phi / 2 \text{ (головний параметричний резонанс)}, \quad (7)$$

або $T_e \approx T_\phi$ (основний резонанс). Параметричний крен може розвиватися як у попутних, так і в зустрічних хвилях. Амплітуда крену може досягати 30–40° і більше, що загрожує зміщенням вантажу та перекиданням. Особливо вразливі контейнеровози з великими розтинами палуб та значним флером шпангоутів [7].

Серфінг – захоплення судна попутною хвилею, коли швидкість судна наближається до фазової швидкості хвилі:

$$V_s \approx c_w = \lambda / T_w = g \times T_w / (2\pi). \quad (8)$$

При серфінгу судно втрачає керованість через зменшення ефективності руля, що може призвести до бро- чингу – мимовільного розвороту лагом до хвилі з подальшим перекиданням. Найбільш небезпечний для суден з великим числом Фруда ($Fr > 0,3$) при $\lambda/L \approx 1,0\text{--}1,5$ [2].

Великі кутові прискорення при бортовій качці створюють небезпечні навантаження на екіпаж, пасажирів та вантаж. Латеральне прискорення на висоті z від осі крену:

$$a_{lat}(z) = z \times \varphi_{\max} \times (2\pi/T_{\varphi})^2, \quad (9)$$

де $\varphi_{\max}$ – максимальна амплітуда крену (рад); T_{φ} – період вільного крену. Критичне значення латерального прискорення – 4,0–4,5 м/с² для безпеки людей та 7–9 м/с² для кріплення вантажу [3]. Судна з малим T_{φ} (жорстке судно) та великою метацентричною висотою GM більш вразливі.

Мертве судно – це стан, коли судно втратило хід та перебуває лагом до хвилі й вітру. Оцінюється здатність судна протистояти одночасному впливу вітрового кренячого моменту та бортової хвильової качки без перекидання. IS Code 2008 (критерій погоди) вимагає [13]:

$$b/a \geq 1,0, \quad (10)$$

де b – площа під кривою відновлювальних плечей; a – площа під кривою плечей вітрового кренячого моменту. Критерії другого покоління доповнюють цю оцінку врахуванням нерегулярного хвилювання.

Таблиця 2

Режими втрати остійності та умови їх виникнення

Режим	Курс хвилі	Умова резонансу	Вразливі судна	Посил.
Чиста втрата остійності	Попутний, кормово-четв.	$\lambda \approx L$, $GM \downarrow$ на гребені	Контейнеровози, ро-ро	§2.4
Параметричний крен	Попутний та зустрічний	$T_e \approx T_{\varphi}/2$	Контейнеровози, великі судна	§2.5
Серфінг/броучинг	Попутний	$V_s \approx c^w$, $Fr \geq 0,3$	Малі швидкохідні судна	§2.6
Надмірні прискорення	Борт., борт.-четв.	$T_e \approx T_{\varphi}$, великий GM	Пасажирські, круїзні	§2.3
Мертве судно	Лагом (дрейф)	Вітер + хвилі одночасно	Всі типи	–

Хвилювання спричиняє додатковий опір руху судна, що призводить до втрати швидкості. Додатковий опір у хвилях складається з двох компонентів: опір від відбиття хвиль та опір від добавленого руху. Загальна формула додаткового опору в регулярних хвилях [5]:

$$R_{aw} = \rho_w \times g \times B^2 \times H_w^2/L \times f(\omega_e, \alpha), \quad (11)$$

де ρ_w – густина морської води; B – ширина судна; H_w – висота хвилі; L – довжина судна; $f(\omega_e, \alpha)$ – функція, що залежить від частоти зустрічі та курсового кута хвилі. Відносна втрата швидкості залежить від стану моря та курсового кута. Емпірична залежність:

$$\Delta V/V_0 = k_1 \times (H_s/L)^{k_2} \times f(\alpha) \quad (12)$$

де V_0 – швидкість на тихій воді; k_1, k_2 – емпіричні коефіцієнти, що залежать від типу судна; $f(\alpha)$ – функція курсового кута (максимальна втрата при зустрічних хвилях $\alpha = 180^\circ$). За даними практики [9], типова втрата швидкості для вантажного судна: при Бофорт 5 ($H_s \approx 2,5$ м) – 5–10 %; при Бофорт 7 ($H_s \approx 5$ м) – 20–40 %; при Бофорт 9 ($H_s \approx 9$ м) – 50–70 %.

Заливання палуби (green water on deck) відбувається, коли борт судна занурюється нижче рівня хвилі. Критерій заливання:

$$f_b < H_s \times k_f(\alpha, L/\lambda) \quad (13)$$

де f_b – надводний борт; k_f – коефіцієнт, що залежить від курсового кута та співвідношення довжин. Заливання палуби створює додаткове навантаження на палубний вантаж, люкові закриття та палубне обладнання, а також загрозу для екіпажу [2].

Слемінг (slamming) – удар днища носової частини об воду при виході з хвилі. Умова слемінгу:

$$d_{nos} < H_s \times k_s \quad \text{та} \quad V_{vert} > V_{crit}, \quad (14)$$

де d_{nos} – осадка носом; k_s – коефіцієнт; V_{vert} – вертикальна швидкість носової частини; V_{crit} – критична швидкість (зазвичай 3–5 м/с). Слемінг може призвести до пошкодження корпусних конструкцій та вимагає зниження швидкості або зміни курсу.

Для підтримки прийняття навігаційних рішень пропонується формалізована матриця оцінки ризику, що інтегрує метеорологічні параметри з характеристиками судна. Згідно з Формалізованою оцінкою безпеки IMO (FSA, MSC/Circ.1023), ризик визначається як комбінація ймовірності небезпечної події та її наслідків [15]:

$$R = P \times C, \quad (15)$$

де R – рівень ризику; P – ймовірність (likelihood); C – тяжкість наслідків (consequence). Для оцінки ризику при погіршенні погодних умов пропонується використовувати індекс метеорологічної небезпеки I_{met} та індекс вразливості судна I_{ship} .

Індекс метеорологічної небезпеки визначається на основі прогнозованих параметрів:

$$I_{met} = w_1 \times S_{вітер} + w_2 \times S_{хвиля} + w_3 \times S_{видим} + w_4 \times S_{облед}, \quad (16)$$

де $S_i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ – бальна оцінка кожного фактора за п'ятибальною шкалою; w_i – вагові коефіцієнти ($w_1 = 0,25$; $w_2 = 0,40$; $w_3 = 0,20$; $w_4 = 0,15$). Хвилювання має найбільшу вагу, оскільки безпосередньо впливає на остійність та морехідність.

Таблиця 3

Шкала бальної оцінки гідрометеорологічних факторів

Бал	Вітер (Бофорт)	Хвилювання H _s	Видимість	Обледеніння
1	0–4 (до 7 м/с)	≤ 1,5 м	> 5 миль	Немає ризику
2	5 (8–11 м/с)	1,5–2,5 м	2–5 миль	Незначний
3	6–7 (11–17 м/с)	2,5–4,0 м	1–2 милі	Помірний
4	8–9 (17–24 м/с)	4,0–7,0 м	0,5–1 миля	Значний
5	≥ 10 (>24 м/с)	> 7,0 м	≤ 0,5 милі	Сильне

Індекс вразливості судна враховує конструктивні та завантажувальні параметри:

$$I_{ship} = f(GM, T_{\phi}, f_b, L/\lambda, Fr, \text{тип вантажу}) \quad (17)$$

Практична оцінка I_{ship} базується на перевірці відповідності параметрів завантаження критеріям IS Code та аналізу чутливості до кожного з п'яти режимів втрати остійності. Комплексний ризик:

$$R_{nav} = I_{met} \times I_{ship}. \quad (18)$$

Таблиця 4

Матриця навігаційного ризику та рекомендовані дії

R_{nav}	I_{met}	I_{ship}	Рівень ризику	Рекомендовані дії
1–4	1–2	1–2	Низький	Звичайне спостереження, оновлення прогнозу
5–9	2–3	2–3	Помірний	Посилене спостереження, перевірка кріплення вантажу, оцінка остійності
10–16	3–4	3–4	Високий	Зміна курсу/швидкості, доповідь капітану, підготовка плану дій
17–25	4–5	4–5	Критичний	Негайна зміна маршруту, штормування, сповіщення компанії

На основі проведеного аналізу розроблено формалізований алгоритм прийняття рішень вахтовим помічником капітана при погіршенні гідрометеорологічних умов. Алгоритм інтегрує вимоги IMO (MSC.1/Circ.1228, IS Code, STCW) з принципами BRM та формалізованою оцінкою ризику.

На першому етапі вахтовий помічник безперервно відстежує гідрометеорологічну обстановку за допомогою: бортових метеорологічних приладів (анемометр, барометр, термометр); NAVTEX – прийом штормових попереджень та прогнозів; карт погоди (факсимільних та цифрових); візуального спостереження за станом моря (оцінка періоду хвиль за MSC.1/Circ.1228 з використанням секундоміра) [2]. При виявленні тенденції до погіршення умов (падіння тиску > 3 гПа/3 год, посилення вітру, зростання хвилювання) переходить до етапу 2, під час якого визначається індекс метеорологічної небезпеки I_{met} за формулою (16) на основі поточних та прогнозованих умов. Оцінюється вразливість судна I_{ship} з урахуванням поточного стану завантаження (GM, осадка, надводний борт). Розраховується комплексний ризик R_{nav} . Перевіряються умови виникнення небезпечних режимів згідно з MSC.1/Circ.1228: порівнюється λ/L , T_e/T_{ϕ} , $V_{s/c}_w$ з критичними значеннями [2]. При $R_{nav} \geq 10$ (високий ризик) – перехід до Етапу 3.

Третій етап – планування дій. Відповідно до принципів BRM, вахтовий помічник: інформує капітана про ситуацію та оцінку ризику; формулює варіанти дій (зміна курсу, зниження швидкості, комбінація, штормування); оцінює наслідки кожного варіанту (вплив на розклад, витрату палива, комфорт екіпажу та безпеку); обирає оптимальний варіант за критерієм мінімального ризику [10]. Рекомендації MSC.1/Circ.1228 щодо уникнення небезпечних зон на полярній діаграмі «курс – швидкість» є основою для вибору безпечного режиму [2].

На четвертому етапі прийняте рішення виконується з дотриманням процедур BRM: чітка комунікація на містку (closed-loop communication); розподіл обов'язків (lookout, радар, ECDIS); документування дій у судовому журналі; безперервний моніторинг ефективності прийнятих заходів [11].

П'ятий етап передбачає, що після стабілізації обстановки або зміни умов відбувається повернення до етапу 1. Якщо прийняті заходи не забезпечують зниження ризику до прийнятного рівня – ескалація (перехід до більш радикальних заходів, сповіщення берегових служб).

Управління ресурсами навігаційного містка (Bridge Resource Management, BRM) – це комплекс принципів та процедур ефективного використання всіх наявних ресурсів (людських, технічних, інформаційних) для

забезпечення безпечного плавання. Конвенція STCW (Таблиці А-II/1 та А-II/2) включає BRM як обов'язкову компетенцію для вахтових помічників та капітанів [4]. У контексті прийняття рішень при погіршенні погодних умов BRM має особливе значення, оскільки помилки в оцінці ситуації та прийнятті рішень є основною причиною аварій, пов'язаних з погодою.

Ключові принципи BRM у контексті метеорологічної безпеки включають: ситуаційну обізнаність – безперервний моніторинг метеообстановки з використанням усіх доступних джерел; розподіл робочого навантаження – при погіршенні умов кількість задач на містку зростає (спостереження, розрахунки, зв'язок, маневрування), що потребує залучення додаткового персоналу; закриту комунікацію – однозначне підтвердження отриманих команд та інформації; асертивність – здатність молодших офіцерів повідомляти про сумніви щодо безпеки, навіть якщо це суперечить рішенням капітана [11].

Практичні рекомендації щодо організації роботи на містку при очікуваному погіршенні метеоумов: завчасно оновити метеорологічний прогноз з усіх доступних джерел (NAVTEX, GMDSS, супутникові дані, погодний роутинг); перевірити стан завантаження судна та відповідність критеріям остійності IS Code; оцінити параметри хвилювання (період, довжину, напрямки) та порівняти з характеристиками судна (L , T_ϕ , GM); визначити небезпечні зони на полярній діаграмі за MSC.1/Circ.1228; підготувати план дій для різних сценаріїв розвитку ситуації; забезпечити кріплення вантажу та готовність водонепроникних закриттів [12].

Реалізація зазначених рекомендацій потребує врахування регіональної специфіки акваторії, в якій здійснюється плавання. Зокрема, гідрометеорологічні умови Чорноморського басейну мають низку характерних особливостей, що суттєво впливають на безпеку судноплавства. Середня глибина моря становить 1 240 м, максимальна – 2 210 м. Обмежені розміри басейну (довжина близько 1 150 км, ширина до 580 км) зумовлюють відносно короткі хвилі з крутими фронтами, що особливо небезпечно для слемінгу та параметричного крену.

Штормова діяльність має виражену сезонність: найбільша повторюваність штормів спостерігається у листопаді–березні. Переважаючі вітри – північно-східного та південно-західного напрямків. Специфічним явищем є бора – різкий холодний вітер, що досягає швидкості 40–50 м/с у Новоросійській бухті та на узбережжі Кавказу. Бора виникає раптово і може створити надзвичайно небезпечні умови для суден на рейді та при вході до порту.

Максимальна висота хвиль у Чорному морі може досягати 7–8 м (в окремих випадках до 11 м у відкритій частині), що є суттєвим для суден малого та середнього тоннажу. Період хвиль зазвичай не перевищує 8–10 с, що відрізняється від океанського хвилювання з періодами 12–18 с. Це означає, що в Чорному морі судна частіше зустрічаються з крутими, короткими хвилями, які створюють більші навантаження на корпус при тій самій висоті [14].

Обледеніння є серйозним фактором ризику для суден у північній частині Чорного моря (Азовське море, протоки) у зимовий період. При температурі повітря нижче -2°C та швидкості вітру понад 10 м/с бризкове обледеніння може призвести до значного збільшення ваги надбудови та зміщення центру ваги вгору, що критично знижує остійність, особливо для малих суден [16].

Висновки

Проведений комплексний аналіз впливу гідрометеорологічних умов на морехідність судна дозволяє сформулювати такі висновки.

1. Систематизовано основні гідрометеорологічні фактори (вітер, хвилювання, зиб, течії, обмежена видимість, обледеніння) та визначено механізми їх впливу на параметри морехідності. Хвилювання є найбільш суттєвим фактором, оскільки безпосередньо впливає на остійність, качку, заливання палуби та слемінг. Для кожного фактора наведено кількісні критерії безпеки.

2. Проаналізовано п'ять режимів динамічної втрати остійності відповідно до критеріїв другого покоління ІМО (MSC.1/Circ.1627): чиста втрата остійності, параметричний крен, серфінг та брочинг, надмірні прискорення та мертве судно. Для кожного режиму визначено умови виникнення, типи вразливих суден та відповідні документи ІМО. Ці критерії суттєво доповнюють класичні вимоги IS Code 2008, оскільки враховують динамічну взаємодію судна з хвилями.

3. Запропоновано формалізовану матрицю оцінки навігаційного ризику, що інтегрує індекс метеорологічної безпеки та індекс вразливості судна. Матриця визначає чотири рівні ризику (низький, помірний, високий, критичний) з конкретними рекомендованими діями для кожного рівня, що забезпечує обґрунтованість навігаційних рішень.

4. Розроблено п'ятиетапний алгоритм прийняття рішень вахтовим помічником капітана при погіршенні гідрометеорологічних умов (моніторинг – оцінка ризику – планування – виконання – перегляд), що інтегрує вимоги ІМО з принципами управління ресурсами навігаційного містка (BRM).

Подальші дослідження доцільно спрямувати у кількох напрямках. По-перше, необхідною є експериментальна апробація запропонованого алгоритму прийняття рішень в умовах навігаційних тренажерних комплексів із моделюванням різних сценаріїв погіршення гідрометеорологічної обстановки. По-друге, практичне впровадження потребує створення відповідного програмного модуля для автоматизованого обчислення індексів метеорологічного ризику та вразливості судна в режимі реального часу. Окремим перспективним завданням є інтеграція

розробленої матриці навігаційного ризику із системами електронної картографії (ECDIS), що дозволить вахтовому помічнику капітана отримувати візуалізовані рекомендації безпосередньо на електронній карті. Крім того, подальшого вивчення потребує адаптація запропонованої методики до різних типів суден з урахуванням їх конструктивних особливостей та умов експлуатації.

Список використаної літератури

1. EMSA. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2024. Lisbon : European Maritime Safety Agency, 2024. 66 p.
2. IMO. MSC.1/Circ.1228. Revised Guidance to the Master for Avoiding Dangerous Situations in Adverse Weather and Sea Conditions. London : International Maritime Organization, 2007. 8 p.
3. IMO. MSC.1/Circ.1627. Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria. London : International Maritime Organization, 2020. 60 p.
4. IMO. STCW Convention and STCW Code, 2017 Consolidated Edition. London : International Maritime Organization, 2017. 432 p.
5. Faltinsen O. M. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge : Cambridge University Press, 1990. 328 p.
6. Rawson K. J., Tupper E. C. *Basic Ship Theory*. 5th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2001. Vol. 2. 727 p.
7. Peters W., Belenky V., Bassler C., Spyrou K., Umeda N., Bulian G., Altmayer B. The Second Generation Intact Stability Criteria: An Overview of Development. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, No. 1. Article 41. <https://doi.org/10.3390/jmse10010041>
8. Begovic E., Bertorello C., Boccadamo G., Rinauro B. Simplified operational guidance for second generation intact stability criteria. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 270. Article 113584. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113584>
9. MAN Energy Solutions. Basic Principles of Ship Propulsion. Copenhagen : MAN Energy Solutions, 2023. 96 p.
10. Пліта М. М., Шевченко А. П., Урум Н. С., Лісовський С. В. Організація ходової навігаційної вахти на морському транспорті. *Водний транспорт*. 2024. № 2, Вип. (40). С. 109–116.
11. Urum N. S., Chufarlicheva A. L., Shtrybets V. V., Lisovskyi S. V. Communication as an important element of Bridge Resource Management on sea transport. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36(75), № 1. С. 375–381.
12. Шевченко А. П., Якусевич Ю. Г., Дорофєєва З. Я., Тришин В. В. Деякі проблеми підготовки моряків на тлі впровадження сучасних інформаційних технологій на морському транспорті. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36(75), № 1. С. 382–388.
13. IMO. International Code on Intact Stability, 2008 (2008 IS Code). Res. MSC.267(85). London : International Maritime Organization, 2008. 100 p.
14. Доронін Ю. П. *Морська гідрометеорологія*. Київ : Вища школа, 2009. 340 с.
15. IMO. MSC/Circ.1023. Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. London : International Maritime Organization, 2002. 68 p.
16. WMO. Guide to Marine Meteorological Services. WMO-No. 471. Geneva : World Meteorological Organization, 2018. 206 p.
17. SOLAS. International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, Consolidated Edition 2020. London : International Maritime Organization, 2020. 586 p.
18. Kobylinski L., Kastner S. *Stability and Safety of Ships: Regulation and Operation*. Amsterdam : Elsevier, 2003. 458 p.
19. Шевченко А. П., Якусевич Ю. Г., Дорофєєва З. Я., Дакі О. А. Оптимізація логістичного ланцюга в контексті забезпечення безпеки мореплавства. *Водний транспорт*. 2024. № 2, Вип. (40). С. 117–124.
20. Ventikos N. P., Louzis K., Koimtzoglou A. The human element as a risk factor in the maritime domain: A review. *Maritime Policy & Management*. 2023. Vol. 50, No. 5. P. 539–566. <https://doi.org/10.1080/03088839.2022.2044792>

References

1. EMSA (2024). *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2024*. Lisbon : European Maritime Safety Agency.
2. IMO (2007). *MSC.1/Circ.1228. Revised Guidance to the Master for Avoiding Dangerous Situations in Adverse Weather and Sea Conditions*. London : International Maritime Organization.
3. IMO (2020). *MSC.1/Circ.1627. Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria*. London : International Maritime Organization.
4. IMO (2017). *STCW Convention and STCW Code, 2017 Consolidated Edition*. London : International Maritime Organization.
5. Faltinsen, O. M. (1990). *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge: Cambridge University Press.
6. Rawson, K. J., & Tupper, E. C. (2001). *Basic Ship Theory* (5th ed., Vol. 2). Oxford : Butterworth-Heinemann.

7. Peters, W., Belenky, V., Bassler, C., Spyrou, K., Umeda, N., Bulian, G., & Altmayer, B. (2022). The Second Generation Intact Stability Criteria: An Overview of Development. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(1), 41. <https://doi.org/10.3390/jmse10010041>
8. Begovic, E., Bertorello, C., Boccadamo, G., & Rinauro, B. (2023). Simplified operational guidance for second generation intact stability criteria. *Ocean Engineering*, 270, 113584. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113584>
9. MAN Energy Solutions (2023). *Basic Principles of Ship Propulsion*. Copenhagen: MAN Energy Solutions.
10. Plita, M. M., Shevchenko, A. P., Urum, N. S., & Lisovskyi, S. V. (2024). Orhanizatsiia khodovoi navihatsiinoi vakhty na morskomu transporti [Organisation of navigational watch on maritime transport]. *Vodnyi transport*, 2(40), 109–116.
11. Urum, N. S., Chufarlicheva, A. L., Shtrybets, V. V., & Lisovskyi, S. V. (2025). Communication as an important element of Bridge Resource Management on sea transport. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky*, 36(75), 1, 375–381.
12. Shevchenko, A. P., Yakusevych, Yu. H., Dorofieieva, Z. Ya., & Tryshyn, V. V. (2025). Deiaki problemy pidhotovky moriakiv na tli vprovadzhennia suchasnykh informatsiinykh tekhnolohii na morskomu transporti [Some problems of seafarers training in the context of modern IT]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky*, 36(75), 1, 382–388.
13. IMO (2008). *International Code on Intact Stability, 2008 (2008 IS Code)*. Res. MSC.267(85). London : International Maritime Organization.
14. Doronin, Yu. P. (2009). *Morska hidrometeorolohiia* [Marine hydrometeorology]. Kyiv : Vyshcha shkola.
15. IMO (2002). *MSC/Circ.1023. Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA)*. London : International Maritime Organization.
16. WMO (2018). *Guide to Marine Meteorological Services*. WMO-No. 471. Geneva : World Meteorological Organization.
17. IMO (2020). *SOLAS: International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, Consolidated Edition 2020*. London : International Maritime Organization
18. Kobylinski, L., & Kastner, S. (2003). *Stability and Safety of Ships: Regulation and Operation*. Amsterdam : Elsevier.
19. Shevchenko, A. P., Yakusevych, Yu. H., Dorofieieva, Z. Ya., & Daki, O. A. (2024). Optymizatsiia lohistychnoho lantsiuha v konteksti zabezpechennia bezpeky moreplavstva [Logistics chain optimization in the context of maritime safety]. *Vodnyi transport*, 2(40), 117–124.
20. Ventikos, N. P., Louzis, K., & Koimtzoglou, A. (2023). The human element as a risk factor in the maritime domain: A review. *Maritime Policy & Management*, 50(5), 539–566. <https://doi.org/10.1080/03088839.2022.2044792>

Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

ТЕХНОЛОГІЯ ЛЕГКОЇ ТА ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 66.061.4:668

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.1.25>

В. Г. ЄФІМОВА

кандидат технічних наук, доцент

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID: 0000-0003-2372-8398

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ БІОЛОГІЧНО АКТИВНИХ ДОБАВОК
З ВІДХОДІВ ПЕРЕРОБКИ БІОМАСИ ЯЛИНИ

В роботі показано, що з метою профілактики та лікування багатьох захворювань перспективно використувати біологічно – активні речовини природного походження, основною перевагою яких є низька токсичність та м'який вплив на організм.

Висвітлено, що одним з доступних та перспективних рослинних препаратів є водорозчинний полісахарид арабіногалактан, основною сировиною при отриманні якого є ялина Карпатська.

Показано, що джерелом для отримання біологічно-активних речовин з ялини є її деревина та кора.

Встановлено на основі літературного огляду, що на основі арабіногалактану розроблено десятки біологічно активних добавок до харчування людини.

Показано, що для раціонального вирішення проблеми отримання арабіногалактану з відходів біомаси ялини необхідно розробити технологію його отримання з відходів біомаси ялини.

Показано, що в роботі було використано два види відходів лісопереробки ялини: деревина та суміш сировини – несортвані відходи лісопиляння ялини, які представляють собою суміш тирси, щепи та кори.

Встановлено з використанням ситового аналізу фракційний склад суміші сировини.

Показано що концентрацію полісахаридів у отриманих зразках визначали фотокалориметричним методом за відомою методикою, а склад вуглеводневої фракції водорозчинних речовин та середні молекулярні маси полісахаридів визначали методом вискозоефективної рідинної хроматографії.

Показано, що для отримання вихідних даних нами було проведено лабораторні експерименти з використанням водневої екстракції ялинкової сировини за різних умов.

Встановлено, що в сухих залишках екстрактів переважають полісахаридні фракції, які на 97–98 % складаються з арабіногалактану.

Визначено оптимальні параметри та розроблено ефективну схему екстракції, що основана на використанні у якості сировини відходів переробки деревини чи суміші відходів.

Показано, що для збільшення виходу екстрактивних речовин було запропоновано проводити подвійну екстракцію, за якої другий екстракт подається на першу екстракцію (свіжа сировина).

Показано, що за розробленою технологією отримані опитні партії водневих та сухих екстрактів, які показали свою ефективність при виробництві біологічно-активних добавок.

Встановлено на базі лабораторних досліджень ефективну технологію отримання арабіногалактану із відходів перероблення ялини водних та сухих екстрактів, що може бути використаний при виробництві біологічно-активних добавок.

Ключові слова: біологічно-активні добавки, сухі екстракти, арабіногалактан, пектинові речовини, відходи ялини, деревинна сировина.

V. G. YEFIMOVA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ORCID: 0000-0003-2372-8398



© В. Г. Єфімова, 2026

Стаття поширюється на умовах відкритої ліцензії CC BY 4.0

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR OBTAINING BIOLOGICALLY ACTIVE ADDITIVES FROM WASTE FROM PROCESSING SPRUCE BIOMASS

The work shows that for the purpose of prevention and treatment of many diseases it is promising to use biologically active substances of natural origin, the main advantage of which is low toxicity and mild effect on the body.

It is highlighted that one of the available and promising herbal preparations is the water-soluble polysaccharide arabinogalactan, the main raw material for obtaining which is the Carpathian spruce.

It is shown that the source for obtaining biologically active substances from spruce is its wood and bark.

It is established on the basis of a literature review that dozens of biologically active additives to human nutrition have been developed based on arabinogalactan.

It is shown that for a rational solution to the problem of obtaining arabinogalactan from spruce biomass waste, it is necessary to develop a technology for its production from spruce biomass waste.

It is shown that two types of spruce wood processing waste were used in the work: wood and a mixture of raw materials – unsorted spruce sawmill waste, which is a mixture of sawdust, chips and bark.

The fractional composition of the raw material mixture was established using sieve analysis.

It is shown that the concentration of polysaccharides in the obtained samples was determined by the photocalorimetric method according to the known method, and the composition of the hydrocarbon fraction of water-soluble substances and the average molecular weights of polysaccharides were determined by the method of high-performance liquid chromatography.

It is shown that to obtain the initial data, we conducted laboratory experiments using hydrogen extraction of spruce raw materials under different conditions.

It was established that polysaccharide fractions predominate in the dry residues of the extracts, which consist of 97–98 % arabinogalactan.

The optimal parameters were determined and an effective extraction scheme was developed, which is based on the use of wood processing waste or a mixture of waste as raw materials.

It is shown that to increase the yield of extractive substances, it was proposed to conduct a double extraction, in which the second extract is fed to the first extraction (fresh raw materials).

It is shown that experimental batches of hydrogen and dry extracts were obtained using the developed technology, which showed their effectiveness in the production of biologically active additives.

An effective technology for obtaining arabinogalactan from spruce processing waste water and dry extracts was established on the basis of laboratory research, which can be used in the production of biologically active additives.

Key words: biologically active additives, dry extracts, arabinogalactan, pectin substances, spruce waste, wood raw materials.

Постановка проблеми

Для профілактики та лікувань багатьох захворювань та отримання екологічно безпечної продукції високої якості перспективно використовувати біологічно – активні речовини (БАР) природного походження. Основна перевага природних БАР перед синтетичними речовинами полягає в низькій токсичності, багатосторонньому та м'якому впливі на організм, гарною переносимістю при тривалому застосуванні [1, 2].

Одним з найбільш перспективних та доступних рослинних препаратів є водорозчинний полісахарид арабіногалактан (АГ), що володіє комплексом унікальних властивостей [3]. Основним видом сировини при отриманні АГ є деревина ялини Карпатської, в якій міститься до 15 % цього цінного полісахариду. Деревина ялини Карпатської є перспективною для використання в якості сировини для промислового отримання одного з найбільш ефективних антиоксидантів – флавоноїда дігідрокверцетина (ДКВ) [1–4].

Поряд з деревиною кора ялини може бути джерелом значної кількості цінних БАР [3]. Слід відмітити, що це в першу чергу комплекс фенольних сполук (15–18 % від маси абсолютно сухої кори), в складі якої переважає ДКВ. Фенольні кислоти, що містяться у цьому комплексі, володіють антиоксидантними, антибактеріальними та протизапальними властивостями.

Конденсовані таніни та пектинові речовини кори ялини також представляють велику практичну зацікавленість. Завдяки виявленій біологічній активності, ці сполуки перспективні для застосування у складі біологічно-активних добавок.

Відомо, що ялина є лісоутворюючою породою в Карпатах. Однак до сих пір основним способом її переробки залишається виробництво піломатеріалів, при цьому 40 % цієї цінної сировини (кора, тирса) потрапляє у відходи. Утилізація відходів шляхом створення виробництв з отримання біологічно активних речовин дозволить значно збільшити рентабельність переробки біомаси ялини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На основі АГ та ДКВ у світі розроблено десятки біологічно активних добавок до харчування людини, а також функціональні лікувально-профілактичні продукти харчування та косметичні засоби [1, 2].

У світі розроблено і реалізовано у промисловому масштабі економічно вигідна та екологічно безпечна технологія отримання АГ та ДКВ з високим ступенем чистоти [2]. У дослідженнях [1–4] показана ефективність

застосування цих препаратів при лікуванні хвороб дихальних шляхів. Але їх масштабне застосування струмується високою собівартістю.

Формулювання мети дослідження

Для раціонального вирішення цієї проблеми необхідно розробити технологію отримання з відходів біомаси ялини сумарних водних екстрактів без виділення і очищення індивідуальних речовин. Отже, метою цієї роботи є розробка технології отримання АГ та ДКВ з відходів біомаси ялини. Екстракти, що отримані із застосуванням цієї технології можуть бути використані при виготовленні біологічно-активних добавок.

Викладення основного матеріалу дослідження

В нашій роботі було використано два види відходів лісопереробки ялини: деревина (тирса, розміром 0,5–2 мм) та суміш сировини – несортовані відходи лісопиляння ялини, які представляють собою суміш тирси (0,5–2 мм), щепи (17 × 9 × 3 мм) та кори (16 × 7 × 1 мм). Співвідношення деревини та кори у відходах становило 9:1 (за масою). З використанням ситового аналізу було визначено фракційний склад суміші сировини: доля частинок розміром 2 мм становить 22,4 мас.%, 2–4 мм – 24,9 мас.%, більш 4 мм – 52,7 мас.%.

Екстракцію проводили при співвідношенні сировина : дистильована вода – 1 : 4 та 1 : 7, при перемішуванні на протязі від 30 хвилин до 4 годин. Екстракти висушували до сталої маси.

Концентрацію полісахаридів у отриманих зразках визначали фотокалориметричним методом за відомою методикою [1–4]. Склад вуглеводневої фракції водорозчинних речовин та середні молекулярні маси (ММ) полісахаридів визначали методом високоефективної рідинної хроматографії (HPLC) з використанням хроматографічної системи Agilent 1260 на колонці PL aquagel – OH- 40 8 мкм, 300 × 7,5 мм, з предколонкою PL aquagel – OH Guard 8 мкм, 50 × 7,5 мм, що відкалібрована за розчинами стандартів – декстранов з молекулярною масою 25, 12, 5 кДа та D – галактози. Термостатування колонки здійснювалося за 25 °С.

Спектри реєстрували на рефрактометричному детекторі, термостатування ячейки здійснювалося за температури 30 °С. Елюент – розчин 0,1 М LiNO₃, швидкість подачі 1,0 мл/хв, об'єм петлі – 20 мкл. Степінь полідисперсності макромолекул АГ розраховували як співвідношення середньомасової та середньочислової молекулярних мас $\frac{M_w}{M_n}$.

Спектри ЯМР ¹³C реєстрували на спектрометрі Bruker DPX 400 з робочою частотою 100 МГц, розчинник – D₂O. Співвідношення ланок арабінози (Ara) та галактози (Gal) у складі макромолекул АГ розраховували за відомою методикою [1–4]. УФ спектри водних розчинів, що було отримано на спектрометрі PerkinElmer UV/Vis у межах 200–700 нм (товщина шару 10 мм). ІЧ – спектри реєстрували в таблетках KBr на спектрофотометрі Specord 75 IR в інтервалі 500–4000 см⁻¹. Вміст флавоноїдів та танинів визначали на спектрофотометрі Unico S 2100, за методикою, що описана у дослідженнях [1–4].

Для отримання вихідних даних нами було проведено лабораторні експерименти з використанням водневої екстракції ялинкової сировини.

Нами було отримано за різних умов екстракти деревини ялини (Таблиця 1). Методами ВЕЖК, ІЧ – та ¹³C ЯМР – спектроскопії показано, що в сухих залишках екстрактів переважають полісахаридні фракції, які на 97–98 % складаються з АГ (за даними ВЕЖК).

Таблиця 1

Характеристика водних екстрактів деревини ялини

№ зразка	Умови екстракції	Сухий залишок екстракту, %	Зольність сухого залишку, %	Вміст у сухому залишку, %		
				АГ	Флавоноїди	Танини
1	23 °С, 1 год	4,1	0,82	92,7	0,45	4,54
2	90 °С, 30 хв	5,3	1,43	90,6	1,32	4,76
3	90 °С, 3 год	4,0	1,19	89,2	3,6	4,5

Дані Таблиці 1 свідчать, що екстракти, які було отримано за температури 90 °С, збагачені флавоноїдами та містять в значній кількості танини – речовини, що використовуються при виробництві БАД. На даних хроматограм АГ відповідає один вузький пік, що свідчить про незначну степінь полідисперсності його макромолекул, (Таблиця 2). Дослідження складу моносахариду АГ $\left(\frac{\text{Gal}}{\text{Ara}} \right)$ методом якісної ¹³C ЯМР – спектроскопії показало, що макромолекули зразків АГ, що отримані за температури 90 °С, містять більше галактозних ланцюгів. Звідси випливає, що при екстракції в більш жорстких умовах в макромолекулах АГ частково відщеплюються бокові арабінозні ланцюги.

Далі нами було проведено екстракцію сумарної ялинкової сировини.

Умови експерименту та характеристика отриманих екстрактів наведена у Таблиці 3.

Таблиця 2

Молекулярно-масові характеристики зразків АГ

№ зразка	ММ, Да	Степінь полідисперсності $\frac{M_w}{M_n}$	$\frac{Gal}{Ara}$
1	14730	1,04	13,7
2	14520	1,10	7,3
3	16070	1,18	10,7

Таблиця 3

Умови екстракції та характеристика отриманих екстрактів

№ дослідження	Умови екстракції			Сухий залишок екстракту, %	Вміст у сухому залишку, %			Зольність, %
	гідро-модуль	t, °C	тривалість, г		Полісахариди	Флаваноїди	Таніни	
1	1 : 4	60	3	4,1	93,33	1,67	2,7	2,3
2	1 : 4	90	3	4,5	91,74	2,37	2,96	2,93
3	1 : 7	60	3	2,3	92,85	1,75	3,01	2,35
4	1 : 7	90	1	1,9	93,00	1,82	3,21	1,97
5	1 : 7	90	3	2,3	90,59	2,12	4,3	2,99
6	1 : 7	90	4	2,3	90,45	2,1	4,44	3,23

У Таблиці 4 наведено дані за виходом продуктів відносно абсолютно сухої сировини (в.с.с.) та розраховані значення виходів, теоретично можливих при екстракції в умовах дослідження, а також дані за ступенем вилучення основних водорозчинних екстрактивних речовин.

Наявність в ІЧ – спектрах полоси поглинання в області 1700 см⁻¹ свідчить про присутність сполук з кислотними групами (фенолокислоти та пектинові речовини). За результатами аналізу методів ВЕЖХ, ІЧ та ¹³С ЯМР – спектроскопії полісахаридної фракції, що виділена з водного екстракту кори ялини та літературними даними о складі полісахаридів відходів ялини це є пектинові речовини. У відповідності даних ВЕЖХ їх середня молекулярна маса становить 6950 Да.

Таблиця 4

Степінь вилучення водорозчинних речовин при екстракції

№ дослідження	Вихід, % від маси в.с.с.*			Степінь вилучення, %		
	полісахариди	флаваноїди	таніни	полісахариди	флаваноїди	таніни
1	8,56/14,22	0,07/0,13	0,38/0,63	60,2	53,8	60,3
2	9,07/17,73	0,12/0,23	0,39/0,64	61,6	60,9	60,9
3	9,05/13,52	0,08/13,56	0,38/0,57	66,9	59,0	66,7
4	9,58/13,97	0,14/0,2	0,38/0,56	68,6	70,0	67,9
5	11,40/15,34	0,39/0,53	0,14/0,18	74,3	73,6	77,8
6	11,32/15,3	0,37/0,51	0,14/0,18	74,0	72,5	77,8

* Перше значення – знайдене, друге – розраховане.

За даними елементного аналізу, в зразках присутності у золі (Таблиця 3). Методами атомно-адсорбційного та рентгенофлуоресцентного аналізу встановлено елементний склад золи сухого залишку екстракту, мг/кг: Са 966, Mg 497, Sr 9,0, К 2520, Na 266, Li < 1,5, Cu < 3,0, Zn 5,3, Pb 3,5, As 0,16, Fe < 7,0, Mn 157, Co < 15, Ni < 15, Cr < 15, Hg 0,006. Вміст сполук важких металів у сухих залишках екстрактів значно нижче гранично допустимого рівня. Високий вміст біогенних елементів (калія, кальцію, магнію) збільшує біологічну цінність екстрактів, що були отримані.

Таким чином, проведені експерименти показали, що шляхом водневої екстракції сировини, що містить деревину та відходи ялини можна отримати комплекс біологічно-активних речовин.

Далі було проведено розробку водневої екстракції відходів переробки ялини.

Відомо, що степінь вилучення екстрактивних речовин з біомаси ялини залежить від вмісту екстрактивних речовин у твердій фазі, розміру частин деревини, співвідношення рідкої та твердої фаз (гдромодуля) температури та тривалості екстракції. Так, при великому значення гідромодуля зростають енергетичні витрати, а зменшення розміру деревини в 2 рази обертається 4-кратним зростанням енерговитрат на подрібнення та 5,6 – кратним зростанням капітальних витрат. Температура впливає на швидкість дифузії екстрактивних речовин, а отже на тривалість процесу екстракції. Остання, в свою чергу, визначає степінь досягнення рівноваги в системі тверде – рідке. На час досягнення рівноваги впливає температура, розмір частинок деревини та різниця концентрацій в початковий момент процесу.

В процесі лабораторних досліджень визначні оптимальні параметри та розроблено ефективну схему екстракції, що оснований на використанні у якості сировини відходів переробки деревини чи суміші відходів.

Для визначення оптимальних умов екстракції у якості критерію оптимальності технологічного процесу було прийнято наведені капітальні витрати (відношення капітальних витрат на одиницю продукції). У відповідності розрахунку матеріального балансу процесу екстракції, при зростанні гідромодуля від 2 до 3 суттєво збільшується вихід екстрактивних речовин, що знижує наведені капітальні витрати. Подальше зростання гідромодуля супроводжується незначним зростанням наведених капітальних витрат (рис. 1). Отже подальше кратне зростання кількості екстрагенту буде супроводжуватись слабким зростанням ступені вилучення та значним зростанням капітальних витрат. Виходячи з даних таблиці 3,4 та рис. 1 було визначено оптимальні умови екстракції: гідромодуль 1:4, тривалість 3 години, температура 90 °С.

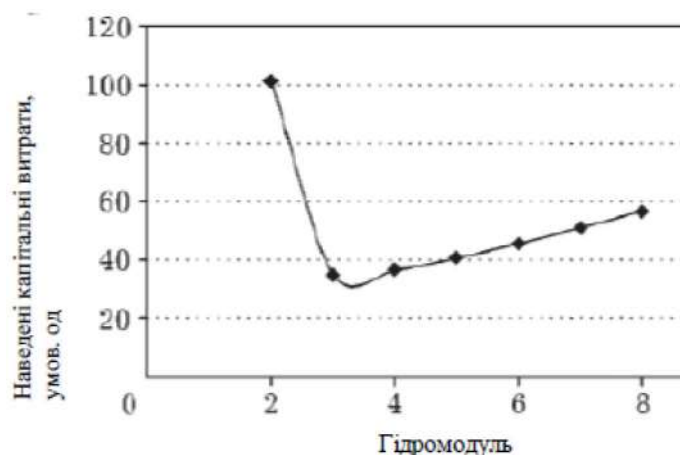


Рис. 1. Залежність капітальних витрат від гідромодуля

Для збільшення виходу екстрактивних речовин було запропоновано проводити подвійну екстракцію, за якої другий екстракт подається на першу екстракцію (свіжа сировина), рис. 2.

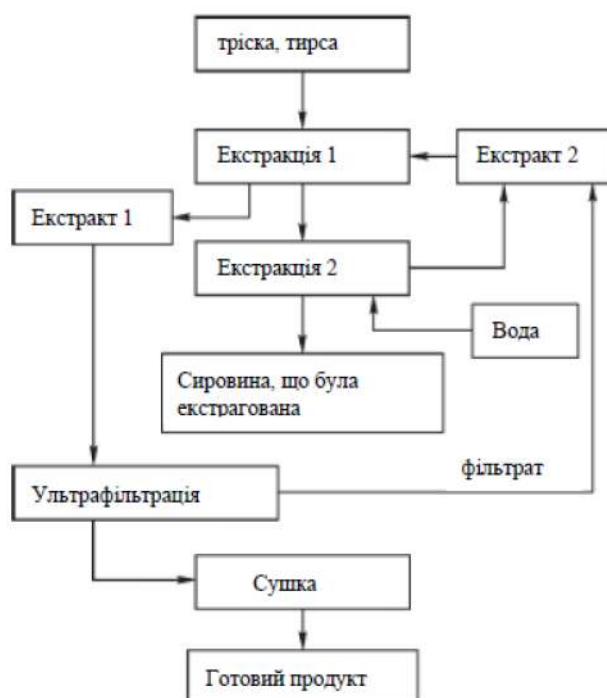


Рис. 2. Схема подвійної екстракції рослинної сировини

Екстракція здійснюється за 60–90 °С за сталої циркуляції екстрагенту крізь шар деревинної сировини. Отриманий екстракт з концентрацією сухих речовин 4–5 % можна використовувати як самостійний продукт при

виробництві БАД. Для отримання сухої добавки екстракт концентрується на ультрафільтраційній установці до вмісту сухих речовин 15–20 %; концентрат висушують на установці, що його розпилює за температури у сушильній камері 110–125 °С.

За розробленою технологією отримані опитні партії водневих та сухих екстрактів, які показали свою ефективність при виробництві БАД.

Висновки і пропозиції

На базі лабораторних досліджень розроблено ефективну технологію отримання із відходів перероблення ялини водних та сухих екстрактів, які можуть бути використані при виробництві БАД.

Список використаної літератури

1. Krupodorova T., Butkevych T., Barshteyn V., Sevindik M., V. Popovych, Z. Polova Effect of the composition of a biologically active dietary supplement with macrofungi mycelia on its antioxidant activity. *Regulatory mechanisms in biosystems*. 2024. Vol. 15(4). P. 932–938.
2. Ma Z. F., Fu C., Lee Y. Y. The Modulatory Role of Bioactive Compounds in Functional Foods on Inflammation and Metabolic Pathways in Chronic Diseases. *Foods*. 2025. Vol. 11. P. 185–197.
3. Vieira S. F., Reis R. L., Ferreira H., Neves N. M. Plant-derived bioactive compounds as key players in the modulation of immune-related conditions. *Phytochemistry reviews*. 2024. Vol. 24. P. 343–460.
4. Xiaoyu J., Ning L., Shu-Cheng H., Cai Z. A Comprehensive Review of Liquorice: The Preparation, Chemical Composition, Bioactivities and Its Applications. *The American Journal of Chinese Medicine*. 2024. Vol. 52. P. 667–716.

References

1. Krupodorova T., Butkevych T., Barshteyn V., Sevindik M., V. Popovych, Z. Polova (2024) Effect of the composition of a biologically active dietary supplement with macrofungi mycelia on its antioxidant activity. *Regulatory mechanisms in biosystems*. Vol. 15(4). P. 932–938.
2. Ma Z. F., Fu C., Lee Y. Y. (2025) The Modulatory Role of Bioactive Compounds in Functional Foods on Inflammation and Metabolic Pathways in Chronic Diseases. *Foods*. Vol. 11. P. 185–197.
3. Vieira S. F., Reis R. L., Ferreira H., Neves N. M. (2024) Plant-derived bioactive compounds as key players in the modulation of immune-related conditions. *Phytochemistry reviews*. Vol. 24. P. 343–460.
4. Xiaoyu J., Ning L., Shu-Cheng H., Cai Z. (2024) A Comprehensive Review of Liquorice: The Preparation, Chemical Composition, Bioactivities and Its Applications. *The American Journal of Chinese Medicine*. Vol. 52. P. 667–716.

Дата першого надходження статті до видання: 11.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

Л. В. САЛЄБА

кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хімічних технологій, експертизи
та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-8290-4163

В. П. НЕСТЕРУК

студентка кафедри хімічних технологій, експертизи
та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0003-6038-8546

О. Я. СЕМЕШКО

доктор технічних наук, старший дослідник,
професор кафедри хімічних технологій, експертизи
та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-8309-5273

ВИКОРИСТАННЯ ІНУЛІНВІСНОЇ СИРОВИНИ У ТЕХНОЛОГІЇ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПІСОЧНОГО ПЕЧИВА

У статті обґрунтовано доцільність використання інуліну та порошку кореня цикорію як інулінвмісної сировини у технології пісочного печива з метою підвищення його харчової та функціональної цінності. Проаналізовано науково-технічну інформацію щодо фізіологічної дії інуліну як розчинного харчового волокна з доведеними пребіотичними властивостями та біологічної активності кореня цикорію як природного джерела інуліну і комплексу біоактивних компонентів. Розроблено дві групи дослідних зразків пісочного печива з додаванням порошку кореня цикорію та інуліну, виділеного з цикорію, у кількості 5 %, 10 % і 15 % від маси борошна.

Досліджено вплив інулінвмісних інгредієнтів на органолептичні, фізико-хімічні та структурно-механічні показники якості готових виробів. Встановлено, що додавання порошку кореня цикорію у кількості 5 % формує присмний кавовий аромат та гармонійні смакові властивості печива, тоді як підвищення дозування спричиняє появу гіркуватого присмаку. Введення інуліну в усьому досліджуваному діапазоні концентрацій не погіршує органолептичні показники та сприяє покращенню реологічних властивостей тіста і формуванню більш розсипчастої консистенції готових виробів. Оптимальними визначено дозування 5 % порошку кореня цикорію та 10 % інуліну від маси борошна.

Розрахунок харчової цінності показав, що контрольний зразок печива характеризується високою калорійністю та низьким вмістом харчових волокон. Додавання порошку кореня цикорію у кількості 5 % від маси борошна забезпечує підвищення вмісту харчових волокон на 67 % без істотної зміни енергетичної цінності. Введення інуліну в кількості 10 % призводить до зростання вмісту харчових волокон у 5,2 рази, що значно покращує дієтичні властивості продукту. Отримані результати підтверджують перспективність використання інулінвмісної сировини для створення функціональних борошняних кондитерських виробів із підвищеною споживчою та біологічною цінністю.

Ключові слова: борошняні кондитерські вироби, пісочне печиво, інулін, корінь цикорію, харчові волокна, функціональні продукти.

L. V. SALEBA

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Chemical Technologies, Expertise and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-8290-4163



V. P. NESTERUK

Student at the Department of Chemical Technologies, Expertise and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0003-6038-8545

O. YA. SEMESKO

Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher,
Professor at the Department of Chemical Technologies, Expertise and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-8309-5273

USE OF INULIN-CONTAINING RAW MATERIALS IN THE TECHNOLOGY OF FUNCTIONAL SHORTBREAD COOKIES

The article substantiates the feasibility of using inulin and chicory root powder as inulin-containing raw materials in the technology for shortbread cookies, thereby enhancing their nutritional and functional value. Scientific and technical literature data on the physiological effects of inulin, a soluble dietary fibre with proven prebiotic properties, and the biological activity of chicory root, a natural source of inulin and a complex of bioactive compounds, were analysed. Two groups of experimental shortbread cookie samples were developed with the addition of chicory root powder and inulin extracted from chicory at levels of 5 %, 10 %, and 15 % of flour weight.

The influence of inulin-containing ingredients on the sensory, physicochemical, and structural–mechanical quality parameters of the finished products was investigated. Adding 5 % chicory root powder resulted in a pleasant coffee-like aroma and balanced sensory characteristics, whereas higher doses led to a bitter aftertaste. Inulin addition across the entire studied concentration range did not adversely affect sensory attributes and contributed to improved rheological properties of the dough, as well as to a more crumbly, tender texture in the finished cookies. The optimal levels were determined to be 5 % chicory root powder and 10 % inulin relative to flour weight.

Nutritional value calculations showed that the control sample had a high caloric content and a low dietary fibre level. The incorporation of 5 % chicory root powder increased dietary fibre content by 67 % without a significant change in energy value. The addition of 10 % inulin increased dietary fibre content by 5.2-fold, significantly improving the product's dietary properties. The results confirm the use of inulin-containing raw materials for the development of functional flour confectionery products with enhanced consumer and biological value.

Key words: flour confectionery products, shortbread cookies, inulin, chicory root, dietary fibre, functional foods.

Постановка проблеми

Борошняні кондитерські вироби є однією з найбільш масових і доступних груп харчових продуктів, які споживаються практично всіма верствами населення. Кондитерська промисловість України характеризується значним виробничим потенціалом, високим рівнем конкуренції та широким асортиментом продукції, що охоплює різні види печива, вафель, пряників, рулетів і кексів [1, 2]. Серед цієї групи продуктів особливе місце посідає печиво, зокрема пісочне, яке відзначається високими органолептичними властивостями, різноманітністю форм і рецептур, зручністю споживання та тривалим терміном зберігання.

Разом із тим пісочне печиво характеризується високою енергетичною цінністю, значним вмістом жирів і легкозасвоюваних вуглеводів, а також недостатнім рівнем есенціальних нутрієнтів і харчових волокон. За умов сучасного способу життя, що супроводжується гіподинамією, високими психоемоційними навантаженнями та незбалансованим харчуванням, це сприяє зростанню поширеності аліментарно-залежних захворювань, зокрема ожиріння, метаболічного синдрому, атеросклерозу та цукрового діабету другого типу [3, 4]. Особливої актуальності ця проблема набуває з огляду на те, що в Україні рівень споживання харчових волокон задовольняє фізіологічні потреби лише приблизно на третину, що зумовлено недостатнім вживанням овочів, фруктів і продуктів із цільного зерна [4].

В рамках теорії адекватного харчування харчові волокна розглядаються як обов'язковий компонент раціону поряд з основними нутрієнтами – білками, жирами, вуглеводами, вітамінами та мінеральними речовинами. Вони відіграють ключову роль у регуляції травлення, підтриманні нормального складу кишкової мікрофлори, процесах детоксикації, регуляції глікемії та ліпідного обміну, а також у профілактиці серцево-судинних і метаболічних порушень [4]. У зв'язку з цим розробка функціональних харчових продуктів, збагачених харчовими волокнами, є одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасних харчових технологій [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Особливий науковий та практичний інтерес становить інулін – природний фруктоолігосахарид, який належить до класу розчинних дієтичних харчових волокон і має доведений пребіотичний ефект. Інулін характеризується стійкістю до дії травних ферментів людини, не гідролізується та не всмоктується в тонкому кишківнику, а досягає товстої кишки, де вибірково ферментується біфідо- та лактобактеріями, стимулюючи їх ріст і метаболічну

активність [5–8]. Це сприяє нормалізації складу кишкової мікробіоти, покращенню функціонального стану травної системи та підвищенню імунного захисту організму.

Завдяки своїм фізіологічним властивостям інулін чинить комплексний позитивний вплив на організм людини: підвищує біодоступність кальцію, магнію, заліза та цинку, сприяє нормалізації ліпідного обміну, знижує рівень холестерину й тригліцеридів у крові, регулює глікемію та має імуномодуючий і гепатопротекторний ефекти [9–11]. Низька енергетична цінність інуліну (1–1,5 ккал/г) і низький глікемічний індекс дозволяють використовувати його у складі продуктів для дієтичного та профілактичного харчування, зокрема для осіб із цукровим діабетом і метаболічними порушеннями [10].

Поряд із біологічною активністю інулін має низку цінних технологічних властивостей, які визначають його перспективність у виробництві борошняних кондитерських виробів. Інулін здатний утворювати з водою гелі з короткою кремоподібною текстурою, що дозволяє частково імітувати жир і знижувати калорійність готової продукції без погіршення органолептичних характеристик. Крім того, інулін підвищує стабільність аерованих і емульсійних систем, покращує структурно-механічні властивості тіста, сприяє формуванню однорідної пористої структури та позитивно впливає на текстуру і смак готових виробів [12]. Висока термостабільність і розчинність інуліну забезпечують його технологічну зручність і можливість введення без істотної модифікації виробничого процесу.

Важливим напрямом є також використання порошку кореня цикорію як інулінвмісної рослинної сировини, що поєднує функціональні та технологічні властивості інуліну з комплексною біологічною дією інших біоактивних компонентів. Коренеплоди цикорію (*Cichorium intybus*) містять до 60 % інуліну, а також фруктозу, леулозу, пектинові речовини, амінокислоти, органічні кислоти, мінеральні елементи та вітаміни, що зумовлює їх високу харчову та біологічну цінність [13]. Доведено, що цикорій має антиоксидантні, біфідогенні, гіпоглікемічні та гіполіпідемічні властивості, позитивно впливає на функціональний стан шлунково-кишкового тракту та сприяє профілактиці цукрового діабету й серцево-судинних захворювань [13–17].

Продукти переробки кореня цикорію широко застосовуються у технологіях хлібобулочних виробів функціонального призначення, де вони сприяють інтенсифікації процесів тістоутворення, підвищенню стабільності й еластичності тіста, регуляції водопоглинання, покращенню структурно-механічних властивостей і подовженню терміну зберігання готової продукції [12, 18–22]. Разом із тим застосування порошку кореня цикорію у складі борошняних кондитерських виробів залишається недостатньо вивченим. Основним технологічним обмеженням є можливість появи гіркуватого присмаку, зумовленого наявністю сесквітерпенових лактонів, що потребує ретельного підбору дозування [18].

З огляду на викладене, актуальним є комплексне дослідження можливостей використання як очищеного інуліну, так і порошку кореня цикорію як інулінвмісної сировини у технології пісочного печива. Такий підхід дозволяє, з одного боку, оцінити ефективність застосування інуліну як функціонального інгредієнта з прогнозованими технологічними властивостями, а з іншого – обґрунтувати доцільність використання натуральної рослинної сировини комплексної дії.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розробка технології двох видів пісочного печива – з додаванням порошку кореня цикорію та інуліну, виділеного з цикорію, та обґрунтування їх оптимального дозування для створення функціональних виробів із підвищеним вмістом розчинних харчових волокон і покращеними органолептичними характеристиками.

Викладення основного матеріалу дослідження

Аналіз науково-технічної інформації показав, що здобне печиво представляє собою борошняний кондитерський виріб, який характеризується високою енергетичною цінністю за рахунок вмісту значної кількості вуглеводів та жирів. Тобто при споживанні здобного печива людина отримує велику кількість калорій і при цьому невелику кількість необхідних нутрієнтів. Це обумовлює доцільність введення до рецептурного складу здобного печива сировинних компонентів, дієтичних добавок, які будуть збагачувати його вітамінами, мінеральними речовинами, незамінними амінокислотами, поліненасиченими жирними кислотами, харчовими волокнами та іншими нутрієнтами, що відносяться до фізіологічно-функціональних інгредієнтів.

Збагачення хімічного складу здобного пісочного печива продуктами переробки цикорію потребує докладних експериментальних досліджень щодо зміни органолептичних, фізико-хімічних, структурно-механічних показників якості готових виробів. Насамперед необхідно визначити оптимальні кількості збагачувальних інгредієнтів, які можна ввести у базову рецептуру пісочного печива.

У дослідженнях використовували сировину та матеріали, що відповідали вимогам чинної в Україні нормативної документації. Детальна характеристика використаної харчової сировини представлена у табл. 1.

Як контрольний зразок було використано випечений пісочний напівфабрикат, виготовлений за традиційною технологією згідно з ДСТУ 3781:2014 [23]. Для дослідження використовували традиційну рецептуру здобного пісочно-виїмного печива [24]. При виготовленні пісочного печива дуже важливим є неухильно контролювати співвідношення жиру, цукру, яєць та борошна, ретельно дотримуватися технології виготовлення тіста, не порушувати послідовність внесення компонентів. З метою визначення оптимального вмісту продуктів переробки цикорію у рецептурі пісочного печива було виготовлено 6 зразків печива з вмістом кореня цикорію та інуліну

Таблиця 1

Характеристика харчової сировини

Назва сировини	Виробник	Нормативна та/або інша документація, яка регламентує показники якості та безпечності
I. Основна сировина		
Борошно пшеничне вищий гатунок	ТМ «Хуторок», Україна	ДСТУ 46.004-99
Цукор білий кристалічний	ТМ «Своя Лінія», Україна	ДСТУ 4623:2006
Масло екстра солодковершкове 82,5 %	ТМ «Golden Cow», м. Херсон, Україна	ДСТУ 4399:2005
Меланж	ТОВ Степанівська птахофабрика, Україна	ДСТУ 5028:2008
Сіль кухонна харчова	Без ТМ, Україна	ДСТУ 3583:2015
Ароматизатор	ТМ «Кондекортех», Україна	ДСТУ 4716:2007
Натрій двовуглекислий	ТМ «Розумний вибір», Україна	ДСТУ 2156-76
Амоній вуглекислий	ТМ «Чемпіон», Україна	ГОСТ 9325:79
II. Додаткова сировина		
Корінь цикорію	ПрАТ «Ліктрави», Україна	ТУ У 10.8-00481181-009:2019
Інулін з кореня цикорію	ТМ «СолоСвіт» (SoloSvit), Україна	ТУ 9187-002-97357430-09

Таблиця 2

Рецептура дослідних зразків пісочного печива із вмістом продуктів переробки цикорію

Сировина	Витрата сировини на 100 г продукту, г						
	Контроль	корінь цикорію			інулін		
		№ 1 5 %	№ 2 10 %	№ 3 15 %	№ 4 5 %	№ 5 10 %	№ 6 15 %
Борошно пшеничне вищого сорту	51,54						
Корінь цикорію	–	2,58	5,15	7,73	–	–	–
Інулін	–	–	–	–	2,58	5,15	7,73
Цукор-пісок	20,62						
Масло вершкове	30,93						
Меланж	7,22						
Сіль кухонна харчова	0,206						
Ароматизатор	0,207						
Натрій двовуглекислий	0,052						
Амоній вуглекислий	0,052						

у кількості 5 %, 10 % і 15 % від маси борошна. Співвідношення компонентів рецептури у досліджуваних зразках печива представлено у табл. 2.

Усю сировину, крім розпушувачів і борошна, перемішували у тістомісильній машині протягом 3–5 хв., потім всипали борошно, розпушувачі та замішували тісто. Готове тісто має вологість 15–16,5 %. Далі його розкочували до товщини 4,5–5 мм і за допомогою виїмок формували печиво прямокутної або круглої форми. Випікали печиво при температурі 200°C протягом 5–6 хв. [24].

На першому етапі роботи проведено оцінювання якісних показників випечених зразків пісочного печива згідно з вимогами ДСТУ 3781:2014, а саме за показниками форми, стану поверхні, кольором, смаком і запахом, виглядом у розломі. Результати визначення впливу продуктів переробки цикорію на органолептичні показники якості досліджуваних зразків пісочного печива представлені в табл. 3.

В результаті проведення аналізу (табл. 3) визначено, що додавання у рецептуру продуктів переробки цикорію призводить до зміни органолептичних показників пісочного печива. Насамперед печиво із вмістом кореня цикорію характеризується дещо темнішим кольором. При додаванні кореня цикорію у кількості 5 % від маси борошна (зразок № 1) у печива з'являється приємний кавовий аромат. Однак, збільшення концентрації цього інгредієнту до 10 % і 15 % (зразки № 2 і № 3) призводить до появи гіркуватого присмаку.

В свою чергу, додавання інуліну у всьому досліджуваному діапазоні концентрацій не змінює смак і запах пісочного печива. Слід відмітити, що введення у рецептуру інуліну впливає на пружно-еластичні властивості пісочного тіста і структуру готового печива. Так, зі збільшенням вмісту інуліну підвищується стабільність та еластичність тіста, що має позитивний ефект у технологічному процесі виробництва на етапі формування тістових заготовок. Крім цього, висока концентрація інуліну у зразку № 6 (15 %) обумовлює утворення більш крихкої і розсипчастої структури пісочного печива.

Таким чином, за результатами проведених органолептичних досліджень можна зробити висновок, що найвищі підсумкові оцінки за всіма показниками якості печива з урахуванням коефіцієнту вагомості отримали зразки печива № 1 і № 5 із вмістом кореня цикорію та інуліну у кількості 5 % і 10 % від маси борошна, відповідно.

Таблиця 3

Органолептичні показники зразків пісочного печива із вмістом продуктів переробки цикорію

Назва показника	Характеристика						
	Контроль	корінь цикорію			інулін		
		№ 1 5 %	№ 2 10 %	№ 3 15 %	№ 4 5 %	№ 5 10 %	№ 6 15 %
Форма	Рівна, не розпливчаста, без пошкоджень та здуття						
Поверхня	Не підгоріла, гладка, без тріщин і пухирців						
Колір	Рівномірний світло-солом'яний, нижня сторона темніша	Рівномірний кремовий, нижня сторона темніша	Кремовий	Інтенсивний кремовий	Рівномірний світло-солом'яний, нижня сторона темніша		
			краї і нижня сторона темніші				
Смак і запах	Приємний, притаманний пісочному печиву, без сторонніх присмаку і запаху	Приємний, притаманний пісочному печиву		Притаманний пісочному печиву, з неприємним гіркуватим присмаком і вираженим кавовим ароматом		Приємний, притаманний пісочному печиву, без сторонніх присмаку і запаху	
		без сторонніх присмаків, з легким кавовим ароматом	з легким гіркуватим присмаком і кавовим ароматом				
Вигляд у розломі	Добре пропечене печиво з рівномірною структурою, без порожнин і слідів непромісу						

Фізико-хімічні показники характеризують якість проведених технологічних процесів, тому їх визначення є невід'ємною частиною експертизи якості готової продукції. Згідно з ДСТУ 3781:2014 якість печива оцінюється за такими фізико-хімічними показниками: масовою часткою вологи, лужністю, намоочуваністю, упіканням [23]. Отримані результати визначення фізико-хімічних показників пісочного печива із вмістом продуктів переробки цикорію наведено у табл. 4.

В ході досліджень встановлено, що при додаванні продуктів переробки цикорію підвищується показник упікання пісочного печива, що призводить до утворення більш розсипчастої консистенції у порівнянні з контрольним зразком. масова частка вологи і намоочуваність печива зростають з підвищенням вмісту кореня цикорію та інуліну, що можна пояснити наявністю у їх складі значної частини харчових волокон. При введенні досліджуваних інулінвмісних продуктів показник лужності пісочного печива не змінюється і відповідає нормативним вимогам.

Таблиця 4

Фізико-хімічні показники зразків пісочного печива із вмістом продуктів переробки цикорію

Назва показника	Контроль	Корінь цикорію			Інулін		
		№ 1 5 %	№ 2 10 %	№ 3 15 %	№ 4 5 %	№ 5 10 %	№ 6 15 %
Упікання, %	10,13	10,57	11,34	11,85	11,23	12,30	12,71
Масова частка вологи, %	7,50	7,52	7,51	7,49	7,63	7,80	7,85
Намоочуваність, %	142	144	147	150	152	155	158
Лужність, град.	1,8	1,8	1,9	1,9	1,7	1,8	1,8

Таким чином, в результаті проведених досліджень встановлено можливість застосування кореня цикорію та інуліну з метою збагачення пісочного печива цінними харчовими волокнами і отримання виробів високої якості. Оптимальний вміст продуктів переробки цикорію у рецептурі пісочного печива складає 5 % для кореня цикорію і 10 % для інуліну від маси борошна.

У табл. 5 наведено харчову цінність пісочного печива, розраховану на 100 г готового продукту, приготованого за обраними рецептурами з даванням інулінвмісної сировини у порівнянні з контрольним зразком.

Таблиця 5

Харчова зразків цінність пісочного печива із вмістом продуктів переробки цикорію

Показник	Контроль	Корінь цикорію	Інулін
		№ 1 5 %	№ 5 10 %
Білки, г	7,8	7,7	7,6
Жири, г	27,4	27,4	27,4
Вуглеводи, г	56,5	56,0	54,8
Волокна, г	1,65	2,75	8,60
Калорійність, ккал	500	495	470

Розрахована харчова та енергетична цінність контрольного зразка та дослідних варіантів печива з додаванням кореня цикорію і інуліну свідчить про суттєвий вплив функціональних інгредієнтів на нутрієнтний профіль готових виробів (табл. 5). Контрольний зразок характеризується типовим для здобного печива співвідношенням макронутрієнтів: високим вмістом жирів (27,4 г/100 г) та вуглеводів (56,5 г/100 г) при помірному вмісті білків (7,8 г/100 г). Вміст харчових волокон у контрольному варіанті становить лише 1,65 г/100 г, що обмежує його фізіологічну цінність з точки зору дієтології та профілактики метаболічних порушень.

Введення до рецептури порошку кореня цикорію в кількості 5 % від маси борошна сприяє зростанню вмісту харчових волокон до 2,75 г/100 г, що на 67 % перевищує аналогічний показник контрольного зразка. Це зумовлено високим вмістом інуліну, целюлози та геміцелюлоз у корені цикорію. При цьому суттєвих змін у вмісті білків, жирів та загальних вуглеводів не спостерігається, а енергетична цінність зменшується незначно, приблизно на 1 %. Таким чином, додавання кореня цикорію дозволяє помірно підвищити біологічну та функціональну цінність продукту без істотного впливу на його калорійність і органолептичні характеристики.

Найбільш виражений ефект зафіксовано у варіанті з інуліном. Введення 10 % інуліну від маси борошна забезпечує зростання вмісту харчових волокон до 8,60 г/100 г, що у 5,2 рази перевищує контрольний показник. Одночасно відзначається зниження масової частки засвоюваних вуглеводів та зменшення енергетичної цінності продукту до 470 ккал/100 г, що на 6 % нижче, ніж у контрольному варіанті. Це пояснюється низькою калорійністю інуліну та його властивістю частково замішувати цукор і борошно у структурі тіста. Підвищення вмісту харчових волокон має важливе фізіологічне значення, оскільки вони сприяють нормалізації моторики шлунково-кишкового тракту, зниженню глікемічного індексу продукту, регуляції ліпідного обміну та формуванню пребіотичного ефекту. Інулін, зокрема, є добре відомим функціональним інгредієнтом із доведеною здатністю стимулювати ріст корисної мікрофлори кишечника, що дозволяє віднести дослідний зразок до категорії функціональних харчових продуктів.

Отримані результати узгоджуються з літературними даними щодо використання цикорію та інуліну у технології борошняних кондитерських виробів і підтверджують перспективність їх застосування для створення продуктів із покращеним нутрієнтним профілем та зниженою енергетичною цінністю.

Висновки

Проведений аналіз науково-технічної інформації та результати експериментальних досліджень підтвердили перспективність використання інулінвмісної сировини у технології пісочного печива. Введення до рецептури порошку кореня цикорію та інуліну, виділеного з цикорію, дозволяє підвищити вміст розчинних харчових волокон і покращити харчову цінність готових виробів.

Експериментально встановлено оптимальні дозування інулінвмісних інгредієнтів, які становлять 5 % порошку кореня цикорію та 10 % інуліну від маси борошна. За таких концентрацій готові вироби характеризуються гармонійними органолептичними властивостями, приємним кавовим ароматом (для зразків із коренем цикорію), покращеними реологічними властивостями тіста та більш розсипчастою і ніжною консистенцією без появи небажаних смакових відтінків.

Показано, що додавання порошку кореня цикорію у кількості 5 % від маси борошна забезпечує зростання вмісту харчових волокон на 67 % без істотних змін калорійності та співвідношення основних макронутрієнтів. Водночас введення 10 % інуліну призводить до підвищення вмісту харчових волокон у 5,2 рази, що істотно покращує дієтичні властивості пісочного печива та розширює можливості його використання у раціонах профілактичного й функціонального харчування.

Список використаної літератури

1. Волков В. П. Оцінка рівня монополізму в кондитерській галузі України / В. П. Волков, Л. А. Горошкова // Теоретичні аспекти економічних процесів в Україні та світі: Вісник Запорізького національного університету. 2015. № 4 (8). С. 181–188.
2. Мащак Н. М. Дослідження ринку кондитерських виробів України: виклики війни та тенденції розвитку / Н. М. Мащак, В. В. Третякова // Академічні візії. 2025. № 45. С. 1–8. URL: <https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/2120>.
3. Оболкіна В. Інноваційні технології здобного печива із застосуванням вівсяного солодового борошна / В. Оболкіна, Н. Смельнікова, Г. Волошук // Інноваційні Хлібопекарська і кондитерська промисловість України. 2018. № 4. С. 16–18.
4. Дубініна А. А. Товарознавство продуктів функціонального призначення / А. А. Дубініна, Т. М. Летута, М. О. Янчева, В. Ф. Бондаренко, В. О. Віннікова, О. С. Круглова. Харків : ХДУХТ, 2015. 189 с.
5. Havrlentova M. Inulin content and its benefits for human health and nutrition: A review / M. Havrlentova, J. Kraic // Journal of Food and Nutrition Research. 2020. Vol. 59(2). P. 117–129. <https://doi.org/10.12345/jfnr.v59i2.117>
6. Cummings J. H. Prebiotic digestion and fermentation / J. H. Cummings, G. T. Macfarlane, H. N. Englyst // The American Journal of Clinical Nutrition. 2001. Vol. 73, Issue 2. P. 415–420. doi: <http://doi.org/10.1093/ajcn/73.2.415s>

7. Apolinario A. C. Inulin-type fructans: A review on different aspects of biochemical and pharmaceutical technology / A. C. Apolinario, B. P. G. de Lima Damasceno, N. E. de Macedo Beltrao, A. Pessoa, A. Converti, J. A. da Silva // *Carbohydrate Polymers*. 2014. Vol. 101. P. 368–378. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.09.081>
8. Roberfroid M. B. Introducing inulin-type fructans / M.B. Roberfroid // *British Journal of Nutrition*. 2005. Vol. 93(S1). P. 13–25.
9. Lunn J. Carbohydrates and dietary fibre / J. Lunn, J. L. Buttriss // *Nutrition Bulletin*. 2007. Vol. 32. P. 21–64.
10. Meyer D. The bifidogenic effect of inulin and oligofructose and its consequences for gut health / D. Meyer, M. Stasse-Wolthuis // *European Journal of Clinical Nutrition*. 2011. Vol. 63(11). P. 1277–1289.
11. Bosscher D. Inulin and oligofructose as functional ingredients to improve bone mineralization / D. Bosscher, J. Van Loo, A. Franck // *International Dairy Journal*. 2006. Vol. 16(9). P. 1092–1097.
12. Буяльська Н. П. Підвищення харчової цінності хлібобулочних і борошняних кондитерських виробів / Н. П. Буяльська, О. Л. Гуменюк, Н. М. Денисова, В. М. Челябієва. Чернівці : ЧНТУ, 2020. 122 с.
13. Wang Q. Perspectives and utilization technologies of chicory (*Cichorium intybus* L.): A review / Q. Wang, J. Cui // *African Journal of Biotechnology*. 2011. Vol. 10, Issue. 11. P. 1966–1977.
14. Licht T. R. Dietary carbohydrate source influences molecular fingerprints of the rat faecal microbiota / T. R. Licht, M. Hansen, M. Poulsen, L. O. Dragsted // *BMC Microbiol*. 2006. Vol. 6(1). P. 98. <http://doi.org/10.1186/1471-2180-6-98>
15. Su P. Selected probiotics support the growth of probiotic mono-cultures in vitro / P. Su, A. Henriksson, H. Mitchell // *Anaerobe*. 2007. Vol. 13 (3-4). P. 134–139. <http://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2007.04.007>
16. Chen Y. S. Effects of prebiotic oligosaccharides and trehalose on growth and production of bacteriocins by lactic acid bacteria / Y. S. Chen, S. Srionnual, T. Onda, F. Yanagida // *Letters in Applied Microbiology*. 2007. Vol. 45 (2). P. 190–193. <http://doi.org/10.1111/j.1472-765x.2007.02167.x>
17. Яворський О.І. Біологічно активні речовини та фармакологічна активність коренів цикорію / О. І. Яворський, Б. М. Зузук, Л. Я. Роговська // *Фармац. журн.* 1993. № 1. С. 70–75.
18. Kisiel W. Guaianolides from *Cichorium intybus* and structure revision of *Cichorium sesquiterpene lactones* / W. Kisiel, K. Zielinska // *Phytochemistry*. 2001. Vol. 57 (4). P. 523–527. [http://doi.org/10.1016/s0031-9422\(01\)00072-3](http://doi.org/10.1016/s0031-9422(01)00072-3)
19. Morris C. The effect of inulin and fructo-oligosaccharide supplementation on the textural, rheological and sensory properties of bread and their role in weight management: A review / C. Morris, G.A. Morris // *Food Chemistry*. 2012. Vol. 133 (2). P. 237–248. <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.01.027>
20. Ziobro R. Influence of inulin on physical characteristics and staling rate of gluten-free bread / R. Ziobro, J. Korus, L. Juszczak, T. Witzczak // *Journal of Food Engineering*. 2013. Vol. 116 (1). P. 21–27. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.049>
21. Souza-Borges P. K. Sensory profile and evaluation of the degree of acceptability of bread produced with inulin and oligofructose / P. K. Souza-Borges, A. C. Conti-Silva // *Brazilian Journal of Food Technology*. 2017. Vol. 21. <http://doi.org/10.1590/1981-6723.4016>
22. Ткаченко Ю. Д. Використання продуктів переробки цикорію коренеплідного у виробництві борошняних кондитерських виробів / Ю. Д. Ткаченко, Н. П. Буяльська, Н. М. Денисова // *Технічні науки та технології*. 2018. № 2(12). С. 196–203.
23. ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови». Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. 20 с.
24. Павлов О. В. Збірник рецептур борошняних кондитерських і здобних булочних виробів / О. В. Павлов. К. : ПрофКнига, 2019. 340 с.

References

1. Volkov, V. P., Horoshkova, L. A. (2015). Otsinka rivnya monopolizmu v kondyters'kiy haluzi Ukrayiny [Assessment of the level of monopoly in the confectionery industry of Ukraine]. *Teoretychni aspekty ekonomichnykh protsesiv v Ukrayini ta sviti: Visnyk Zaporiz'koho natsional'noho universytetu* [Theoretical aspects of economic processes in Ukraine and the world: Bulletin of the Zaporizhzhia National University], 4 (8), 181–188 [in Ukrainian].
2. Mashchak, N. M., Tretyakova, V. V. (2025). Doslidzhennya rynku kondyters'kykh vyrobiv Ukrayiny: vyklyky viyny ta tendentsiyi rozvytku [Research on the confectionery market of Ukraine: challenges of war and development trends]. *Akademichni vizyiyi* [Academic Visions], 45, 1–8. URL: <https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/2120> [in Ukrainian].
3. Obolkina, V., Yemel'nikova, N., Voloshuk, H. (2018). Innovatsiyni tekhnolohiyi zdobnoho pechyva iz zastosuvannyam vivsyanooho solodovoho boroshna [Innovative technologies of shortbread cookies using oat malt flour]. *Innovatsiyni Khlibopekars'ka i kondyters'ka promyslovist' Ukrayiny* [Innovative Bakery and Confectionery Industry of Ukraine], 4, 16–18 [in Ukrainian].

4. Dubinina A. A., Letuta T. M., Yancheva M. O., Bondarenko V. F., Vinnikova V. O., Kruhlova O. S. (2015). *Tovarovnavstvo produktiv funktsional'noho pryznachennya [Commodity science of functional products]*. Kharkiv : KHDUKHT [in Ukrainian].
5. Havrlentova M., Kraic J. (2020). Inulin content and its benefits for human health and nutrition: A review. *Journal of Food and Nutrition Research*, 59(2), 117–129. <https://doi.org/10.12345/jfnr.v59i2.117>
6. Cummings J. H., Macfarlane G. T., Englyst H. N. (2001). Prebiotic digestion and fermentation. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 73 (2), 415–420. doi: <http://doi.org/10.1093/ajcn/73.2.415>
7. Apolinario A. C., de Lima Damasceno B. P. G., de Macedo Beltrao N. E., Pessoa A., Converti A., da Silva J. A. (2014). Inulin-type fructans: A review on different aspects of biochemical and pharmaceutical technology. *Carbohydrate Polymers*, 101, 368–378. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.09.081>
8. Roberfroid M. B. (2005). Introducing inulin-type fructans. *British Journal of Nutrition*, 93(S1), 13–25.
9. Lunn J., Buttriss J. L. (2007). Carbohydrates and dietary fibre. *Nutrition Bulletin*, 32, 21–64.
10. Meyer D., Stasse-Wolthuis M. (2011). The bifidogenic effect of inulin and oligofructose and its consequences for gut health. *European Journal of Clinical Nutrition*, 63(11), 1277–1289.
11. Bosscher D., Van Loo J., Franck A. (2006). Inulin and oligofructose as functional ingredients to improve bone mineralization. *International Dairy Journal*, 16(9), 1092–1097.
12. Buyal's'ka N. P., Humenyuk O. L., Denysova N. M., Chelyabiyeva V. M. (2020). *Pidvyshchennya kharchovoyi tsinnosti khlibobulochnykh i boroshnyanykh kondyters'kykh vyrobiv: monohrafiya [Increasing the nutritional value of bakery and flour confectionery products]*. Chernihiv : CHNTU [in Ukrainian].
13. Wang Q., Cui J. (2011). Perspectives and utilization technologies of chicory (*Cichorium intybus* L.): A review. *African Journal of Biotechnology*, 10 (11), 1966–1977.
14. Licht T. R., Hansen M., Poulsen M., Dragsted L. O. (2006). Dietary carbohydrate source influences molecular fingerprints of the rat faecal microbiota. *BMC Microbiol.*, 6(1), 98. <http://doi.org/10.1186/1471-2180-6-98>
15. Su P., Henriksson A., Mitchell H. (2007). Selected prebiotics support the growth of probiotic mono-cultures in vitro. *Anaerobe*, 13 (3–4), 134–139. <http://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2007.04.007>
16. Chen Y.S., Srionnual S., Onda T., Yanagida F. (2007). Effects of prebiotic oligosaccharides and trehalose on growth and production of bacteriocins by lactic acid bacteria. *Letters in Applied Microbiology*, 45 (2), 190–193. <http://doi.org/10.1111/j.1472-765x.2007.02167.x>
17. Yavors'kyi O. I., Zuzuk B. M., Rohov's'ka L. Ya. (1993). *Biologichno aktyvni rechovyny ta farmakologichna aktyvnist' koreniv tsykoriyu [Biologically active substances and pharmacological activity of chicory roots]*. *Farmats. zhurn. [Pharmac. Journal]*, 1, 70–75 [in Ukrainian].
18. Kisiel W., Zielinska K. (2001). Guaianolides from *Cichorium intybus* and structure revision of *Cichorium* sesquiterpene lactones. *Phytochemistry*, 57 (4), 523–527. [http://doi.org/10.1016/s0031-9422\(01\)00072-3](http://doi.org/10.1016/s0031-9422(01)00072-3)
19. Morris C., Morris G. A. (2012). The effect of inulin and fructo-oligosaccharide supplementation on the textural, rheological and sensory properties of bread and their role in weight management: A review. *Food Chemistry*, 133 (2), 237–248. <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.01.027>
20. Ziobro R., Korus J., Juszczak L., Witczak T. (2013). Influence of inulin on physical characteristics and staling rate of gluten-free bread. *Journal of Food Engineering*, 116 (1), 21–27. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.049>
21. Souza-Borges P. K., Conti-Silva A. C. (2017). Sensory profile and evaluation of the degree of acceptability of bread produced with inulin and oligofructose. *Brazilian Journal of Food Technology*, 21. <http://doi.org/10.1590/1981-6723.4016>
22. Tkachenko Yu. D., Buyal's'ka N. P., Denysova N. M. (2018). *Vykorystannya produktiv pererobky tsykoriyu koreneplidnoho u vyrobnytstvi boroshnyanykh kondyters'kykh vyrobiv [Use of chicory root processing products in the production of flour confectionery products]*. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi [Technical Sciences and Technologies]*, 2(12), 196–203 [in Ukrainian].
23. DSTU 3781:2014 *Pechyvo. Zahal'ni tekhnichni umovy [Biscuits. General technical conditions]*. Kyiv : Minekonomrozvytku Ukrayiny [in Ukrainian].
24. Pavlov O. V. (2019). *Zbirnyk retseptur boroshnyanykh kondyters'kykh i zdobnykh bulochnykh vyrobiv [Collection of recipes for flour confectionery and butter bakery products]*. Kyiv : ProfKnyha [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 18.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

UDC 004.8:004.056

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.1.27>

M. V. BAUTINA

Master, Data Scientist

SoftServe

ORCID: 0009-0002-9617-9262

**RESILIENCE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS
TO ADVERSARIAL QUERIES AND JAILBREAK ATTACKS**

The relevance of this research is driven by the rapid proliferation of AI systems in critically important and regulated fields, which is accompanied by an increasing risk related to adversarial queries and jailbreak attacks. These attacks undermine the reliability, predictability, and safety of the operation of language and multimodal models, posing threats to information security, compliance with ethical and legal standards, and public trust in AI-generated results.

The goal of this article is to provide a comprehensive scientific understanding of the mechanisms underlying the vulnerabilities of modern AI systems to adversarial queries and jailbreak attacks, as well as to justify scientific and technical approaches to enhancing their robustness within the constraints of current security alignment models.

The research methods are based on a theoretical analysis of current scientific literature in the fields of AI and information security, as well as system and structural-functional approaches. The methods also include logical generalization and comparative analysis of the types of adversarial attacks and technical defense strategies for AI.

The results of the study demonstrate that the effectiveness of jailbreak attacks is determined by the statistical nature of AI's language understanding, its instructional orientation, and the high contextual dependency of generation. The main types of adversarial attacks are systematized, the limitations of isolated protective solutions are established, and the necessity of combining architectural, training, and procedural strategies to enhance AI robustness is proven. Key scientific and practical challenges in implementing protection measures are identified, particularly those related to scalability, maintaining the functional utility of models, and the incomplete formalization of threat landscapes.

The conclusions indicate that ensuring the resilience of AI systems to jailbreak attacks requires a shift from reactive blocking mechanisms to the systemic design of security as a fundamental property of intelligent systems.

The prospects for future research are related to the development of formalized threat models, agreed-upon metrics for evaluating robustness, and adaptive security mechanisms capable of evolving alongside AI usage practices.

Key words: model robustness, information security, language models, security policy bypass, adversarial impact, security alignment, contextual manipulation, defense architectures, resilience evaluation, adaptive security mechanisms.

M. B. БАУТИНА

магістр, спеціаліст з обробки даних

SoftServe

ORCID: 0009-0002-9617-9262

**СТІЙКІСТЬ СИСТЕМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДО АДВЕРСАРІАЛЬНИХ ЗАПИТІВ
ТА JAILBREAK-АТАК**

Актуальність дослідження зумовлено стрімким поширенням систем ШІ у критично важливих і регульованих сферах, що супроводжується зростанням ризиків, пов'язаних із адверсаріальними запитами та jailbreak-атаками. Такі атаки підривають надійність, передбачуваність і безпечність функціонування мовних і мультимодальних моделей, створюючи загрози інформаційній безпеці, дотриманню етичних і правових норм та суспільній довірі до результатів роботи ШІ.

Метою статті є комплексне наукове осмислення механізмів формування вразливостей сучасних систем ШІ до адверсаріальних запитів і jailbreak-атак та обґрунтування науково-технічних підходів до підвищення їх робастності за умов обмеженості чинних моделей безпекового узгодження.

Методи дослідження ґрунтуються на теоретичному аналізі сучасних наукових джерел у галузях ШІ та інформаційної безпеки, системному та структурно-функціональному підходах, логічному узагальненні, порівняльному аналізі типів адверсаріальних атак і технічних стратегій захисту ШІ.

Результати дослідження засвідчують, що ефективність jailbreak-атак зумовлена статистичною природою мовного розуміння ШІ, його інструктивною орієнтацією та високою контекстною залежністю генерації. Систематизовано основні типи адверсаріальних атак, встановлено обмеженість ізольованих захисних



© M. V. Bautina, 2026

Стаття поширюється на умовах відкритої ліцензії CC BY 4.0

рішень і доведено необхідність поєднання архітектурних, навчальних та процедурних стратегій для підвищення робастності ІІІ. Виявлено ключові науково-практичні проблеми реалізації захисту, пов'язані з масштабованістю, збереженням функціональної корисності моделей і неповнотою формалізації простору загроз.

Висновки полягають у тому, що забезпечення стійкості ІІІ до jailbreak-атак потребує переходу від реактивних механізмів блокування до системного проєктування безпеки як базової властивості інтелектуальних систем.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням формалізованих моделей загроз, узгоджених метрик оцінювання робастності та адаптивних механізмів безпеки, здатних еволюціонувати разом із практиками використання ІІІ.

Ключові слова: робастність моделей, інформаційна безпека, мовні моделі, обхід політик безпеки, адверсаріальний вплив, безпекове узгодження, контекстна маніпуляція, архітектури захисту, оцінювання стійкості, адаптивні механізми безпеки.

Introduction

The active integration of artificial intelligence (AI) systems into critical areas of public activity, such as education, healthcare, financial services, public administration, cybersecurity, and defense technologies, has led to a significant increase in the demands for their reliability, predictability, and safety. As large language and multimodal models are widely used, the issue of AI's resilience to adversarial queries and jailbreak attacks (i.e., deliberate strategies designed to bypass the built-in restrictions of AI systems) has become especially relevant. These attacks aim to manipulate the logic of response generation, breach established security policies, or access prohibited or potentially dangerous content. Such influences not only reduce trust in AI technologies but also create additional risks to information security, personal data protection, compliance with ethical and legal standards, and, in some application contexts, to the stability of digital infrastructure and national security.

The scientific problem of ensuring AI robustness against adversarial influences is closely related to fundamental tasks in the development of machine learning theory, the formalization of threat models, the investigation of generalization and stability properties of neural network architectures, as well as methods for the verification, validation, and controlled training of intelligent systems. At the same time, it has a clear practical dimension, as it correlates with tasks such as designing secure information systems, developing mechanisms for early detection and neutralization of jailbreak strategies, enhancing AI's resistance to manipulative linguistic constructs and contextual attacks, and establishing standards for the responsible and secure use of AI. In this context, research on AI robustness is a key prerequisite for its integration into regulated and high-risk environments, ensuring alignment between functional efficiency, security, and public trust in the results produced by intelligent systems.

Literature Review

A review of recent studies indicates that jailbreak attacks constitute a distinct class of adversarial influences inherent to the internal logic of large language and multimodal models. Lu L. et al. demonstrate that the effectiveness of jailbreak strategies is determined by latent dependencies between system instructions, user prompts, and contextual representations, which enables systematic bypassing of safety alignment mechanisms [1]. Strohmer H. et al. empirically confirm the fragility of existing defensive measures, showing that adaptive and multi-stage prompts significantly reduce model resilience even under layered protection schemes [2]. Shayegani E. et al. generalize these findings by classifying jailbreak prompts as a semantic-behavioral subclass of adversarial attacks that exploit instruction hierarchy confusion and contextual ambiguity in LLMs [3]. Mao Y. et al. further extend this perspective by showing that the transition from LLMs to multimodal models and autonomous agents increases the attack surface and structural complexity of jailbreak defenses, reinforcing the systemic nature of the problem within the modern AI ecosystem [4].

The mechanisms underlying the implementation of jailbreak attacks and methods for bypassing security alignment in AI model behavior are discussed in several studies that focus on analyzing the behavior of large language models under adversarial influences. In a study by X. Qi and colleagues, it is experimentally demonstrated that visual adversarial examples can trigger jailbreak states even in fine-tuned models, thus significantly broadening the scope of attack surfaces beyond text-based queries [5]. B. Hannon and co-authors propose a methodology for systematically testing the robustness of language models using new classes of adversarial prompts, proving the repeatability and scalability of the issue across different architectures [6]. Li et al. and co-authors analyze the optimization of prompts in the protective context, while also identifying the structural weaknesses of language models exploited during jailbreak attacks [7]. The synthesis of experimental results by Y. Tao and co-authors shows significant variability in the robustness of large language models, depending on architectural decisions and the characteristics of training datasets [8].

A distinct group of studies is dedicated to the development of active methods for enhancing robustness and counteracting jailbreak attacks. Liu F. and colleagues propose an adversarial tuning approach, which involves purposefully retraining language models on specially crafted adversarial examples, thus reducing the effectiveness of bypassing constraints [9]. Cantini R. and co-authors demonstrate that jailbreak queries can serve as a tool for detecting hidden model biases, while also highlighting the instability of many defensive mechanisms against combined semantic manipulations [10]. Wang Y. and co-authors develop a prompt adversarial tuning method that integrates both attack and defense scenarios into a unified

training cycle, improving the overall model resilience [11]. Pingua B. and colleagues introduce a prompt-based approach, Prompt-G, aimed at dynamically countering jailbreak attacks without significantly compromising the functional utility of the models [12].

The final group consists of summarizing and methodological studies that expand the scope of AI robustness issues. Ma J. and co-authors show that jailbreak attacks are relevant not only for language models but also for diffusion models, highlighting the universal nature of this threat to generative artificial intelligence [13]. Yi S. and co-authors conduct a systematic review of existing attacks and defenses, providing a comprehensive view of the current state of research in this field [14]. Donato J. proposes approaches for benchmarking the robustness of language models against prompt-based adversarial attacks, laying the foundation for standardized comparative analysis of defense strategies' effectiveness [15].

Despite the significant volume of research in the field of AI security, the issue of its robustness against adversarial queries and jailbreak attacks remains partially unresolved. The causes of the effectiveness of such attacks, particularly in relation to language understanding, the instructive behavior of models, and safety alignment constraints, have not been sufficiently analyzed or integrated. There is also a lack of systematic categorization of adversarial attacks, considering their combined and evolutionary nature, as well as a generalization of strategies to enhance robustness from the perspectives of scalability and maintaining functional utility. The formalization of the threat space and the objective assessment of defense solutions' effectiveness remain unresolved. The proposed study aims to address these gaps through a comprehensive analysis of the causes of AI vulnerabilities, generalization of adversarial attack types, and a systematic exploration of technical strategies to enhance robustness. This approach will deepen the theoretical understanding of the issue and provide a foundation for practical approaches to developing more resilient and secure intelligent systems.

Objective and Tasks of the Article

The objective of this article is to conduct a comprehensive study of the mechanisms behind the vulnerabilities of modern AI systems to adversarial queries and jailbreak attacks, and to justify scientific and technical approaches to enhancing their robustness within the constraints of current safety alignment models.

To achieve this goal, the article aims to address the following tasks:

1. Analyze the causes of AI system vulnerability to jailbreak attacks and categorize the main types of adversarial attacks.
2. Generalize the technical strategies for enhancing AI robustness and identify the scientific and practical limitations of their implementation.
3. Formulate recommendations and outline promising directions for the development of secure and resilient AI systems.

Results

The effectiveness of jailbreak attacks in AI systems is determined by a combination of cognitive-linguistic, architectural, and procedural factors inherent in the very logic of modern language models. These attacks primarily exploit the statistical nature of AI language understanding, which is based not on the semantic interpretation of the user's intent but on the probabilistic prediction of token sequences within a given context. This leads to situations in which queries that are formally correct, but manipulative or subtly harmful, can be interpreted by the model as acceptable.

Furthermore, the problem is exacerbated by the instructional orientation of language models, developed through reinforcement learning from human feedback. In this process, priority is given to the usefulness and compliance of responses, rather than strictly adhering to constraints in ambiguous or borderline cases. The limitations of current approaches to safety alignment are evident in the fragmentation of rules, the contextual sensitivity of filters, and the inability to fully encompass the entire space of potential attacks. These factors make AI systems vulnerable to non-trivial strategies for bypassing defenses (Table 1).

In real-world scenarios involving the use of intelligent systems, the factors listed in the table manifest not in isolation but as interconnected mechanisms that form a predictable logic for bypassing the protective constraints of AI. The statistical nature of language understanding in applied services, ranging from digital assistants to analytical platforms, enables users to mask operationally significant instructions as neutral or expert-level formulations. This approach is especially effective in professional domains, where the model expects complex abstract queries and lacks sufficient grounds to block them decisively [8, p. 183].

The AI's tendency toward instructional behavior in practical use is further amplified by its focus on providing complete and useful responses, which is critical for user support services, educational environments, and automated advisors. This creates opportunities for crafting conditional, scenario-based, or role-playing contexts, within which the model may interpret undesirable actions as permissible elements of explanation or simulation. Context-dependent generation allows for the gradual shifting of the semantic boundaries of interaction, thereby reducing the effectiveness of local security filters without explicitly violating established rules. In practice, the limitations of current safety alignment mechanisms are most evident in large-scale AI systems with a significant number of users, where control is mainly enforced through generalized policies and template-based restrictions [14].

In such conditions, adversarial strategies quickly adapt to defense updates by exploiting the "gray zones" between permissible analysis and prohibited instructive actions. This results in the formation of a persistent practical effect,

Table 1

Key factors affecting the effectiveness of jailbreak attacks in AI systems

Factor	Manifestation in AI language models	Implications for security
Statistical nature of language understanding	Interpretation of queries based on probabilistic language patterns without deep semantic analysis of intent	Possibility of masking unwanted instructions in a formally acceptable context
Instructive behavior of models	Tendency to prioritize user requests in order to maximize the usefulness of the response	Increased likelihood of circumventing restrictions through role-playing or conditional scenarios
Contextual dependence of generation	Influence of previous messages and stylistic frameworks on response logic	Use of multi-step jailbreak strategies
Limited safety alignment	Inability to formalize all prohibited scenarios and attack options	The existence of “gray areas” in security policies
Adaptability of attacks	Rapid evolution of jailbreak methods in response to security updates	Constant lag in defense mechanisms

Source: compiled by the author based on [5, p. 21531; 6; 7, p. 40189; 8, p. 183; 14]

Table 2

Main types of adversarial attacks on AI systems

Type of attack	Implementation mechanism	Potential consequences for AI functioning
Prompt injection	Introduction of hidden or priority instructions into the input text or context	Disruption of response logic, ignoring system restrictions
Role-playing jailbreak strategies	Imposing an alternative role model or interaction scenario	Generation of unwanted content within conditionally acceptable limits
Obfuscation jailbreak attacks	Masking prohibited instructions through stylistic, linguistic, or semantic transformations	Complicating automatic attack detection
Adversarial retraining	Influencing the model through specially formed training or semi-training data	Formation of persistent undesirable behavioral patterns
Combined attacks	Combination of several approaches within a single scenario	Increased effectiveness of bypassing protective mechanisms

Source: compiled by the author based on [5, p. 21532; 7, p. 40187; 10, p. 56; 13, p. 3144–3145; 14]

where jailbreak attacks evolve from being isolated incidents to outcomes of systemic compromises between functional flexibility, scalability, and AI security. This highlights the need to reconsider approaches to ensuring AI robustness in real-world applications.

Adversarial attacks on AI represent a structurally diverse set of methods aimed at disrupting the proper functioning of the model or bypassing embedded security mechanisms without directly violating formal interaction rules. In modern language and multimodal systems, these attacks are predominantly carried out at the level of input data, interaction context, or training procedures, which complicates their unambiguous identification and necessitates classification based on functional characteristics. The most common attacks involve altering the interpretation of instructions, imposing alternative roles or semantic frames, and interfering with the fine-tuning process to generate hidden, undesirable behavioral patterns.

In applied AI systems, various types of adversarial attacks are implemented as targeted engineering practices adapted to specific model deployment environments. Prompt injection is most commonly used in systems where the language model is integrated with external data sources or software tools, such as search and analytics services, automated agents, or corporate chatbots. In these contexts, hidden instructions embedded in textual data or metadata can alter the prioritization of command execution, leading to uncontrolled actions by the model without formally violating access policies. Role-based jailbreak strategies, in practice, exploit the AI's ability to adapt its response style and logic to the assigned role, a feature typical in educational, training, and consulting systems [10, p. 56]. Switching the model into simulation, expert analysis, or historical reconstruction mode allows for bypassing content restrictions, as the model interprets prohibited instructions as elements of an abstract scenario.

Obfuscation attacks, in turn, are used in environments with strict filters, where direct formulation of a forbidden query is not possible. These attacks rely on the use of indirect linguistic constructs, interlingual transitions, or complex stylistic transformations, which complicate the automatic detection of threats. Adversarial retraining, on the other hand, has a fundamentally different practical dimension, as it is not related to a one-time interaction but to the long-term evolution of AI behavior. In systems that use user feedback or partial online learning, systematically introducing specially selected examples can gradually alter the model's internal priorities, creating persistent undesirable generation patterns [13, p. 3145]. The combined use of these approaches in real-world conditions enables attacks to achieve high effectiveness, even in the presence of multi-level protection mechanisms. This highlights the need for a comprehensive, system-oriented approach to ensuring AI robustness.

Increasing AI robustness against adversarial influences in contemporary research is viewed as a comprehensive engineering and algorithmic challenge that extends beyond individual filters or heuristic rules. Current technical strategies focus on intervening at various levels of model operation – ranging from architecture and learning processes to operational procedures and control mechanisms. These strategies aim to reduce AI sensitivity to manipulative queries without a critical loss in functional efficiency. An important feature of the current approach is the shift away from purely reactive

blocking mechanisms in favor of system-level solutions that promote the development of resilient model behavior in an uncertain and evolving threat landscape (Table 3).

Table 3

Technical strategies for improving the robustness of AI systems

Group of strategies	Technical essence of the approach	Expected effect
Architectural	Separation of component roles, multi-level generation, isolation of critical modules	Reducing the impact of local attacks on the overall behavior of the model
Training	Adversarial learning, contrasting goals, behavior regularization	Formation of stable generalizations and reduction of sensitivity to manipulation
Procedural	Contextual control, anomaly monitoring, multi-stage response approval	Early detection and containment of undesirable scenarios
Hybrid	Combination of technical and organizational mechanisms	Improving overall reliability in real operating conditions

Source: compiled by the author based on [6; 9; 11, p. 64247; 12; 15, p. 62]

Architectural solutions are typically implemented in productive services, where the language model ceases to be the sole decision-making entity and functions as one element within a more complex system. This allows for the limitation of the consequences of potentially harmful actions, such as isolating generation from execution or restricting access to sensitive resources. In practice, this reduces risks even when language restrictions are partially bypassed. Training strategies in applied systems are most often used not to achieve absolute security, but to reduce the unstable behavior of models in complex contexts [6]. During retraining or periodic model adaptation, these strategies help smooth AI responses to provocative or atypical queries, enabling the model to demonstrate more predictable behavior without losing the ability to handle diverse tasks. This is particularly important for services with open interactions, where full filtering of input data is technically infeasible. Procedural approaches in operational practice serve as a compensatory mechanism that complements architectural and training solutions in an ever-changing threat landscape. They are integrated into workflows as elements of monitoring, control, and post-facto analysis, enabling the detection of anomalous AI usage scenarios during user interaction or after response generation [11, p. 64247]. Combined, these approaches form not a static protection system, but an adaptive model of robustness that can evolve with AI usage practices and maintain functional effectiveness in real-world applications.

The implementation of strategies to protect AI from jailbreak attacks is accompanied by systemic scientific and practical limitations that significantly hinder the achievement of stable robustness in real-world operational environments. One of the key issues is the limited scalability of protective solutions, as approaches that are effective in laboratory or controlled settings lose their efficacy in large, production systems with high variability in queries and contexts [9]. The expansion of AI usage inevitably leads to an increase in the diversity of jailbreak strategies, making full threat coverage virtually unattainable.

A significant limitation is the conflict between enhancing security and maintaining the functional utility of models. Rigid filters, context restrictions, or aggressive blocking mechanisms reduce AI flexibility, degrade the quality of responses, and increase the number of false refusals in legitimate scenarios, which negatively impacts the effectiveness of intelligent systems in practice. An additional challenge arises from the incompleteness in formalizing the threat landscape, caused by the adaptive and combined nature of jailbreak attacks, which evolve rapidly and exploit «gray areas» between permitted and prohibited behaviors.

Limitations are also linked to the difficulties of objectively assessing the effectiveness of protective mechanisms, as the absence of universal robustness metrics in dynamic operational conditions complicates the comparison of approaches and creates a risk of misplaced confidence in the security of models [15, p. 63]. Collectively, these issues demonstrate that protecting AI from jailbreak attacks requires a continuous adaptive approach and a balance between security, scalability, and practical system usability.

Enhancing the robustness of AI against jailbreak attacks in contemporary conditions should be viewed as an ongoing process that integrates technical, methodological, and operational solutions. A key recommendation is to shift from local, reactive defense mechanisms to multi-layered security architectures, where the language model is not the sole decision-making entity but operates within a tightly controlled environment with restricted access to critical actions and resources. This approach helps minimize the impact of potential security bypasses, even in cases of partial degradation of the model's behavioral constraints.

An important direction for enhancing robustness is the development of training strategies focused not only on replicating known attack scenarios but also on fostering stable AI behavior in uncertain conditions. This involves integrating adversarial and contrastive training methods aimed at reducing model sensitivity to manipulative contexts, as well as regularly updating training data to reflect the evolving practices of jailbreak attacks. At the same time, it is advisable to implement procedural controls, such as contextual monitoring, post-generation auditing, and risk assessment, which help mitigate the inevitable limitations of automated defense mechanisms.

The future of secure and resilient intelligent systems is linked to further formalizing the threat landscape, developing consistent robustness metrics, and creating adaptive security models capable of evolving alongside the AI application environment. In the long term, this involves shifting the focus from individual technical solutions to system-level AI design, where security is considered a fundamental property rather than an additional module. Such an approach lays the foundation for the responsible deployment of AI in high-risk and regulated domains, ensuring a sustainable balance between functional effectiveness, security, and public trust.

Conclusions

The study found that the vulnerability of AI systems to adversarial queries and jailbreak attacks is systemic and is driven by the fundamental characteristics of language models, including the statistical nature of language understanding, their instructional orientation, and the high contextual dependency of generation. It was shown that jailbreak attacks are a specific subclass of adversarial influences aimed at bypassing behavioral and security constraints, and their effectiveness increases when different strategies are combined within a single interaction scenario.

It was also found that existing technical strategies for enhancing AI robustness form multi-layered defense systems; however, they do not provide complete resilience in isolation. Key challenges in their practical implementation include limited scalability in productive environments, the conflict between enhancing security and maintaining the functional utility of models, and the inherent incompleteness of threat landscape formalization due to the adaptive nature of jailbreak attacks. Another limitation is the absence of standardized metrics for evaluating robustness, which complicates the objective verification of defense solution effectiveness.

The study justifies the need for a shift toward the systemic design of AI, where security and robustness are considered fundamental properties of the architecture, rather than merely supplementary mechanisms. Future research prospects are linked to the development of formalized threat models, the creation of agreed-upon robustness indicators, and the development of adaptive security mechanisms capable of evolving alongside AI usage practices in high-risk and regulated sectors.

References

1. Lu L., Yan H., Yuan Z., Shi J., Wei W., Chen P. Y., Zhou P. AutoJailbreak: Exploring jailbreak attacks and defenses through a dependency lens. *arXiv preprint*. 2024. arXiv:2406.03805. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.03805>
2. Strohmer H., Dasri Y., Murzello D. Exploring Security Vulnerabilities in ChatGPT Through Multi-Technique Evaluation of Resilience to Jailbreak Prompts and Defensive Measures. *2024 International Conference on Computer and Applications (ICCA)*, Cairo, Egypt, 2024. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCA62237.2024.10928071>
3. Shayegani E., Mamun M. A. A., Fu Y., Zaree P., Dong Y., Abu-Ghazaleh N. Survey of vulnerabilities in large language models revealed by adversarial attacks. *arXiv preprint*. 2023. arXiv:2310.10844. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.10844>
4. Mao Y., Cui T., Liu P., You D., Zhu H. From LLMs to MLLMs to Agents: A Survey of Emerging Paradigms in Jailbreak Attacks and Defenses within LLM Ecosystem. *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2506.15170. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.15170>
5. Qi X., Huang K., Panda A., Henderson P., Wang M., Mittal P. Visual adversarial examples jailbreak aligned large language models. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 38, № 19. P. 21527–21536. DOI: <https://doi.org/10.1609/aaai.v38i19.30150>
6. Hannon B., Kumar Y., Gayle D., Li J. J., Morreale P. Robust testing of AI language model resiliency with novel adversarial prompts. *Electronics*. 2024. Vol. 13, № 5. Article 842. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13050842>
7. Li B., Wang H., Zhou A. Robust Prompt Optimization for Defending Language Models Against Jailbreaking Attacks. *Advances in Neural Information Processing Systems 37*, Vancouver, BC, Canada, 10–15 December 2024. San Diego, California, USA, 2024. P. 40184–40211. URL: <https://doi.org/10.52202/079017-1270> (date of access: 30.12.2025).
8. Robustness of Large Language Models Against Adversarial Attacks / Y. Tao et al. *2024 4th International Conference on Artificial Intelligence, Robotics, and Communication (ICAIRC)*, Xiamen, China, 27–29 December 2024. 2024. P. 182–185. URL: <https://doi.org/10.1109/icairc64177.2024.10900215> (date of access: 30.12.2025).
9. Liu F., Xu Z., Liu H. Adversarial tuning: Defending against jailbreak attacks for LLMs. *arXiv preprint*. 2024. arXiv:2406.06622. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.06622>
10. Are Large Language Models Really Bias-Free? Jailbreak Prompts for Assessing Adversarial Robustness to Bias Elicitation / R. Cantini et al. *Lecture Notes in Computer Science*. Cham, 2025. P. 52–68. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-78977-9_4 (date of access: 30.12.2025).
11. Fight Back Against Jailbreaking via Prompt Adversarial Tuning / Y. Wang et al. *Advances in Neural Information Processing Systems 37*, Vancouver, BC, Canada, 10–15 December 2024. San Diego, California, USA, 2024. P. 64242–64272. URL: <https://doi.org/10.52202/079017-2049> (date of access: 30.12.2025).
12. Pingua B., Murmu D., Kandpal M., Rautaray J., Mishra P., Barik R. K., Saikia M. J. Mitigating adversarial manipulation in LLMs: a prompt-based approach to counter jailbreak attacks (Prompt-G). *PeerJ Computer Science*. 2024. Vol. 10. Article e2374. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13501821>

13. Jailbreaking Prompt Attack: A Controllable Adversarial Attack against Diffusion Models / J. Ma et al. *Findings of the Association for Computational Linguistics: NAACL 2025*, Albuquerque, New Mexico. Stroudsburg, PA, USA, 2025. P. 3141–3157. URL: <https://doi.org/10.18653/v1/2025.findings-naacl.172> (date of access: 30.12.2025).
14. Yi S., Liu Y., Sun Z., Cong T., He X., Song J., Li Q. Jailbreak attacks and defenses against large language models: A survey. *arXiv preprint*. 2024. arXiv:2407.04295. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.04295>
15. Donato J. Benchmarking LLM Robustness Against Prompt-Based Adversarial Attacks. *2025 20th European Dependable Computing Conference Companion Proceedings (EDCC-C)*, Lisbon, Portugal, 8–11 April 2025. 2025. P. 60–63. URL: <https://doi.org/10.1109/edcc-c66476.2025.00031> (date of access: 30.12.2025).

Дата першого надходження статті до видання: 05.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

V. V. BONDAR

Postgraduate Student at the Informational Security
and Computer Engineering Department
Cherkasy State Technological University
ORCID: 0009-0002-3230-5979

INFERENCE-TIME SCALING AS A UNIVERSAL PRINCIPLE IN MACHINE LEARNING: CLASSIFICATION AND CROSS-DOMAIN ANALYSIS

This paper proposes a formal definition and classification of inference-time scaling methods across machine learning. Inference-time scaling – spending additional computation at prediction time to improve output quality – appears throughout the field but has not been unified within a single framework. Methods as varied as ensemble averaging, Monte Carlo tree search, test-time augmentation, chain-of-thought reasoning in large language models, iterative denoising in diffusion models, and ODE solving in flow matching share one structural property: quality improves with additional inference computation, subject to diminishing returns. Unfortunately, these methods are studied by separate communities, and no existing taxonomy spans more than a single domain. We argue that it blocks the sharing and enrichment of methods across different areas of machine learning.

We propose a classification organized by computational topology – the structure of the additional computation performed at prediction time – comprising six types: sequential refinement, parallel sampling with aggregation, tree/graph search, test-time model adaptation, guided generation, and adaptive computation routing. Each method is decomposed into generation, selection, and allocation policies, providing a uniform analytical language.

The analysis identifies four cross-domain invariants: a universally sublinear cost-quality curve, a verifier bottleneck limiting selection-based approaches, a sequential–parallel duality across all domains examined, and method migration between domains once their shared structure is recognized.

Key words: inference-time scaling, test-time compute, machine learning, generative models, chain-of-thought, diffusion models, flow matching, ensemble methods, Monte Carlo tree search, adaptive computation.

В. В. БОНДАР

аспірант кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії
Черкаський державний технологічний університет
ORCID: 0009-0002-3230-5979

МАСШТАБУВАННЯ НА ЕТАПІ ІНФЕРЕНСУ ЯК УНІВЕРСАЛЬНИЙ ПРИНЦИП У МАШИННОМУ НАВЧАННІ: КЛАСИФІКАЦІЯ ТА МІЖДОМЕННИЙ АНАЛІЗ

У роботі запропоновано формальне визначення та узагальнену класифікацію методів масштабування на етапі інференсу в машинному навчанні. Під масштабуванням на етапі інференсу розуміємо практику збільшення обчислювальних витрат під час прогнозування, щоб підвищити якість вихідного результату. Такі підходи трапляються в багатьох підгалузях, проте досі їх не було зведено до спільної системи. До них належать, зокрема, усереднення ансамблів, пошук Монте-Карло по дереву, аугментація на етапі тестування, міркування у форматі “ланцюжку роздумів” у великих мовних моделях і ітеративне розшумлення в дифузійних моделях. Попри різну природу, ці методи об'єднують одна структурна ознака: додаткові обчислення під час інференсу, як правило, покращують якість, однак приріст зменшується зі зростанням обчислювального бюджету. Водночас їх традиційно аналізують всередині окремих задач, а наявні таксономії здебільшого залишаються доменно-специфічними.

Ми вводимо класифікацію за обчислювальною топологією, тобто за тим, як організовано додаткові обчислення на етапі прогнозування. Вона охоплює шість класів: послідовне уточнення, паралельне семплювання з подальшою агрегацією, пошук у дереві або графі, адаптація моделі на етапі тестування, керована генерація та адаптивна маршрутизація обчислень. Для уніфікованого опису кожен підхід подано через три компоненти: стратегія генерації, стратегія відбору та стратегія розподілу обчислювальних ресурсів.

Порівняльний аналіз дозволяє виділити чотири міждоменні інваріанти: загально сублінійну залежність між додатковою «вартістю» обчислень і приростом якості; вузьке місце моделі оцінювання, що обмежує підходи, побудовані на відборі; послідовно-паралельну дуальність, яка проявляється в усіх розглянутих доменах; перенесення методів між доменами після явного опису їх спільної структури.

Ключові слова: масштабування на етапі інференсу, обчислення під час тестування, машинне навчання; генеративні моделі; «ланцюжок роздумів»; дифузійні моделі; узгодження потоків; ансамблеві методи; пошук Монте-Карло по дереву; адаптивні обчислення.



© V. V. Bondar, 2026

Стаття поширюється на умовах відкритої ліцензії CC BY 4.0

Problem Statement

Scaling computational resources at training time has, for the past decade, served as the dominant path toward better models. Kaplan and colleagues documented power-law dependencies between language model loss and training budget over seven orders of magnitude [1]; Hoffmann and colleagues refined the optimal split between model capacity and data volume for a fixed budget [2]. Following these laws, architectures grew from millions to hundreds of billions of parameters. But the trajectory has limits: training costs rise steeply with each generation while marginal gains narrow, high-quality data is running thin in many domains, and deploying very large models raises latency and infrastructure issues.

A different line of work has been gaining ground: spending extra computation at prediction time rather than at training time. Chain-of-thought prompting has the model write out intermediate reasoning, each token costing a forward pass [3]. Diffusion models treat the denoising step count as a quality dial [4]. Flow matching varies ODE integration precision [5]. Monte Carlo tree search devotes a variable simulation budget to each move in the game [6]. Ensembles aggregate outputs of multiple models at test time [7]. Different as they look, these methods share one feature: more computation at prediction time means better results, with diminishing returns.

The trouble is that these methods inhabit separate literatures. Work on test-time compute for language models does not cite work on denoising schedules; ensemble theory and tree search belong to different scholarly traditions. Surveys published to date cover language models only [8, 9]. On top of that, several well-known techniques – test-time augmentation [10], Monte Carlo Dropout [11], in-context learning [12] – clearly qualify as inference-time scaling but are rarely categorized that way. The result is a fragmented picture that blocks cross-domain transfer and conceals regularities holding across architectures.

In our earlier work we identified parallels between iterative refinement in large language models, diffusion models, and flow matching [13]; the probability transformation function framework provided the mathematical grounding [14]. What the present paper does is extend this analysis from three families of generative models to the whole of machine learning – classical methods, search algorithms, test-time adaptation, and adaptive computation included – to address the absence of a classification covering the full scope of inference-time scaling.

Analysis of Recent Research and Publications

Scaling laws and the training–inference boundary. The scaling laws established by Kaplan and colleagues [1], together with the compute-optimal training ratios proposed by Hoffmann and colleagues [2], both assumed that inference is a fixed-cost operation – a single forward pass per input. Snell and colleagues broke with this assumption. Their experiments showed that an adaptive test-time strategy, one that chooses between sequential chain-of-thought reasoning and parallel sampling with verification depending on query difficulty, can match a model fourteen times larger [15]. That result put inference-time compute on the same footing as model size and training data as a scaling axis.

Large language models. Chain-of-thought prompting, introduced by Wei and colleagues, shows that generating intermediate reasoning steps improves multi-step task performance at proportional computational cost [3]. Self-consistency, proposed by Wang and colleagues, redirects that cost from sequential depth into parallel breadth: multiple reasoning chains are sampled, and the final answer is chosen by majority vote [16]. Yao and colleagues generalized both under a tree-search formulation, with chain-of-thought and self-consistency falling out as limiting cases [17]. How well parallel strategies work depends almost entirely on the quality of the verifier. Process reward models that give per-step feedback outperform outcome-level scoring [18], but even the best learned verifiers saturate: Brown and colleagues found that coverage – the chance of having at least one correct answer in the sample pool – keeps growing as a power law, while the ability to pick that answer out levels off much sooner [19]. A separate development has been the emergence of reasoning models trained via reinforcement learning – OpenAI’s o1 [20], DeepSeek-R1 [22], and budget-forcing approaches like s1 [22] – which internalize test-time scaling into the model itself. Hao and colleagues ran MCTS over LLM-generated reasoning, connecting this to classical planning [23].

Diffusion and flow matching. In denoising diffusion models, generation proceeds through T noise-removal steps; quality depends on T but saturates after a point [4]. Song and colleagues unified diffusion with score matching under a continuous SDE framework, turning the step count into a smooth control parameter [24]. A wave of later work – deterministic reverse processes, high-order ODE solvers, restart strategies – reshaped the cost-quality curve without touching the trained weights, each method rethinking how best to spend a given inference budget. Guidance mechanisms add per-step cost in exchange for steered outputs: classifier guidance injects external classifier gradients [25], while classifier-free guidance interpolates conditional and unconditional scores at each step [26]. Ma and colleagues took a different path entirely, spending inference compute on searching over the space of initial noise seeds and selecting the best output through a learned verifier [28] – a procedure that mirrors best-of- N sampling in language models down to its structure. Flow matching learns a velocity field transporting prior samples to data via ODE integration; the number of integration steps directly controls quality [5], and adaptive solvers concentrate steps wherever the dynamics are rigid.

Classical methods and search. Ensemble methods [7], Monte Carlo Dropout [11], and test-time augmentation [10] represent straightforward cases of spending more inference compute to get better predictions. Test-time training [28], entropy-based adaptation via TENT [29], and meta-learning through MAML [30] take a different route, investing test-time

computation in adjusting the model's parameters for each input or task. Beam search sets decoding quality through beam width [31]. The MCTS lineage – AlphaGo and its successors AlphaZero and MuZero [6] – turns simulation budget into playing strength. AlphaFold's recycling mechanism [32] and AlphaCode's million-sample generation pipeline [33] are further domain-specific instances of the same idea.

Existing surveys. Welleck and colleagues [8] and Balachandran and colleagues [9] have both published surveys on inference-time methods, as have several other groups, yet every one of them stays within the language-model domain. Diffusion, flow matching, ensembles, search, test-time adaptation – none of these appear. Our own prior analysis of generative model parallels [13] and the probability transformation function framework [14] forms the starting point that the present paper broadens to machine learning at large.

Research Objective

The goal of this study is to build a classification of inference-time scaling methods covering machine learning in its entirety. More specifically, the work sets out to: give a formal definition of inference-time scaling as a general principle; propose a taxonomy whose primary axis is the computational topology of the extra work done at prediction time; place methods from classical machine learning, search, generative modeling, and adaptive computation within that taxonomy; and draw out cross-domain regularities – in cost scaling, in the limits of verification, and in the interplay of sequential and parallel strategies – that hold across architectures and application areas.

Main Research Material

Formal definition. Take $f_{\theta}(x)$ to be a base model producing output through a single forward pass at a cost $C_{\min}$. We call any procedure $y^* = \text{ITS}(f_{\theta}, x, C)$ an inference-time scaling method if the expected output quality $E[Q(y^*)]$ does not decrease as the computational budget C grows beyond $C_{\min}$. The trade-off characteristic of such methods is that cost rises at least linearly with additional work while quality grows sublinearly – typically as $Q \propto \log C$ or $Q \propto C^{\alpha}$ for some $\alpha < 1$.

Any method fitting this definition breaks down into three parts. A generation policy π_{gen} dictates how additional outputs or refinement steps come into being – one after another, in parallel, or through branching. A selection policy π_{sel} determines how the results are handled: averaging, voting, verifier-based scoring, or convergence to a fixed point. An allocation policy π_{alloc} splits the total budget between generation and selection. The decomposition works across domains without modification. In diffusion sampling, generation is sequential, selection is implicit, allocation is fixed. Self-consistency generates in parallel, selects by vote, and allocates uniformly. MCTS generates along a tree, selects via UCB, and allocates a simulation budget. Test-time augmentation generates in parallel, selects by averaging, and allocates a fixed number of augmentations. One framework fits all four.

Type I: Sequential Refinement. The output passes through a chain of dependent steps, each taking its predecessor's result as input: $x_0 \rightarrow f_{\theta}(x_0) = x_1 \rightarrow \dots \rightarrow x_n$. Cost is $O(n \cdot C_{\text{step}})$. Under this heading fall the denoising iterations in diffusion models [4], the integration steps in flow matching where finer discretization tightens trajectory accuracy [5], chain-of-thought reasoning in which each token refines the model's working representation of the problem [3], the extended reasoning chains produced by RL-trained systems such as o1 and DeepSeek-R1 [20, 21], the recycling passes in AlphaFold that feed structure predictions back as input [32], and adaptive-depth architectures where the number of processing layers varies per input. What ties these together is causal dependency: each step waits on the one before it, and there is no way around the sequential bottleneck.

Type II: Parallel Sampling with Aggregation. Here, multiple independent outputs are drawn from the same input, then combined or filtered. Cost is $O(n \cdot C_{\text{single}})$, and the work is fully parallelizable. The subtypes varies on how aggregation is done. In sample-then-select, an external verifier picks the strongest candidate – reward models for language tasks [18] or unit tests for code generation, as in AlphaCode [33]. In sample-then-vote, majority agreement serves as a stand-in for correctness, the mechanism behind self-consistency [16]. In sample-then-average, every output contributes equally – this is how ensembles [7], Monte Carlo Dropout [11], and test-time augmentation [10] operate. An empirical regularity worth noting: the probability of having at least one correct solution among n samples follows an exponentiated power law [19], yet the practical gains stall earlier because the selection mechanism runs out of discriminative power before generation runs out of variety.

Type III: Tree/Graph Search. Computation branches into a space of partial solutions, with evaluation and pruning at each node. The worst case is $O(b^d)$ for branching factor b and depth d , though pruning makes real costs far lower. Beam search keeps w candidate sequences alive at each decoding step [31]. Monte Carlo tree search repeatedly selects, expands, simulates, and backpropagates – the engine behind the AlphaGo family [6], and more recently applied to LLM reasoning via RAP [23]. Tree of Thoughts lets the language model itself evaluate and branch over reasoning steps [17]. Classical algorithms like A^* fit here too: they spend search effort to drive down solution cost.

Type IV: Test-Time Model Adaptation. Rather than generating additional outputs, these methods spend computation on updating the model's own parameters before or during prediction. Test-time training runs a self-supervised auxiliary loss on each test sample [28]. TENT minimizes the model's output entropy by adjusting batch normalization statistics at test time [29]. MAML is designed from the start in such a way that a few gradient steps on a small support set will specialize the model to a new task [30]. In-context learning occupies a borderline position: appending more demonstrations

to the prompt raises the inference cost and lifts performance, yet no parameters actually change [19]. From a compute-accounting perspective it fits the definition either way.

Type V: Guided Generation. An external signal steers the generation process step by step, adding computational overhead at every iteration. In diffusion, classifier guidance feeds in gradients from a separately trained classifier [25]; classifier-free guidance gets the same effect by running both a conditional and an unconditional forward pass per step [26]. For language models, process reward models score partial reasoning traces to direct search [18]. Retrieval-augmented approaches pull in relevant documents at inference time, expanding the input at additional cost. What limits all of these is the quality of the guiding signal itself – a mediocre classifier or a noisy reward model caps the benefit regardless of how many steps are spent.

Type VI: Adaptive Computation Routing. In this type the total budget does not grow; it is reallocated. Easy inputs get less computation, hard ones get more. Early-exit architectures let confident predictions skip deeper layers. Mixture-of-experts models route different tokens through different parameter subsets. Cascades send queries through progressively larger models, stopping at the first one that is confident enough. Speculative decoding drafts tokens with a small model and verifies them in batch with the full one, cutting average cost without changing the output distribution. Budget-controlled reasoning, as in the *s1* approach, enforces a minimum thinking allocation per query [22]. What distinguishes Type VI from the rest is that the compute is not increased – it is spent more deliberately.

Cross-domain observations. The taxonomy, taken as a whole, reveals four regularities that cut across types and domains.

The cost-quality curve is sublinear everywhere. Add denoising steps to a diffusion model, reasoning tokens to a language model, trees to a random forest, or simulations to MCTS – quality grows logarithmically or as a power law with an exponent below one. The consistency of this pattern across unrelated architectures suggests it is an intrinsic feature of iterative refinement rather than a characteristic of any single system.

All selection-based methods – the sample-then-select variant of Type II and all of Type III – hit a verifier bottleneck. The pool of candidate outputs keeps expanding with additional samples, but the fraction of that pool that the verifier can correctly distinguish plateaus [19]. Where verification is automated – unit tests for code, formal proof checkers, game outcomes with known rules – the bottleneck is milder. Where it relies on learned models, verification becomes the constraint that binds first.

A sequential–parallel duality runs through every domain considered. Chain-of-thought and self-consistency are the sequential and parallel faces of the same coin in language models. Denoising steps and noise-seed search play analogous roles in diffusion. Depth and breadth compete for the same budget in any tree search. Evidence from language models shows that easy instances favor sequential refinement while hard ones benefit from parallel exploration [15]. The structural prerequisites for this trade-off – diminishing marginal returns on depth, independent variance across parallel draws – are present wherever inference-time scaling operates, though empirical confirmation outside NLP remains to be done.

Finally, methods travel between domains once their inference-time scaling character is recognized. MCTS originated in board games and migrated to LLM reasoning [23]. The majority-vote logic of self-consistency resurfaced in noise-level search for diffusion [27]. At the level of computational structure, classifier guidance in diffusion and reward-model-steered decoding in language models are the same thing. The classification developed here provides a systematic way to identify these transfers and, more importantly, to flag directions in which transfer has not yet been tried.

Conclusions

This study put forward a formal definition and a six-type classification of inference-time scaling methods that work across the whole of machine learning. The taxonomy, organized by computational topology, covers sequential refinement, parallel sampling with aggregation, tree/graph search, test-time model adaptation, guided generation, and adaptive computation routing. Methods ranging from classical ensembles and beam search to Monte Carlo Tree Search, test-time training, chain-of-thought reasoning, and diffusion denoising were placed within this framework through a three-part decomposition into generation policy, selection policy, and allocation policy.

Four regularities surfaced in the analysis: a sublinear cost-quality curve observed across all six types, a verifier bottleneck capping the gains from selection-based strategies, a sequential–parallel duality running through every domain examined, and documented instances where methods moved from one domain to another – a process the taxonomy makes easier to pursue deliberately. The classification also identified a set of well-known methods – test-time augmentation, Monte Carlo Dropout, ensemble averaging, in-context learning – that fall under the proposed definition of inference-time scaling despite not being conventionally treated that way.

The work grows out of our earlier analysis of inference-time scaling in generative models [13, 14] and extends it to machine learning as a whole. Open questions for future research include empirical testing of the sequential–parallel duality in domains beyond NLP, theoretical foundations for the sublinear scaling law, composite strategies that mix multiple topology types in one system, and models that learn to pick their own inference-time regime on a per-input basis.

Bibliography

1. Kaplan J., McCandlish S., Henighan T. J., Brown T. B., Chess B., Child R., Gray S., Radford A., Wu J., Amodei D. Scaling Laws for Neural Language Models. ArXiv. 2020. arXiv:2001.08361. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.08361>
2. Hoffmann J., Borgeaud S., Mensch A., Buchatskaya E., Cai T., Rutherford E.,... Sifre L. An empirical analysis of compute-optimal large language model training. Advances in neural information processing systems. 2022. Vol. 35, pp. 30016-30030. DOI: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3600270.3602446>
3. Wei J., Wang X., Schuurmans D., Bosma M., Xia F., Chi E.,... Zhou D. Chain-of-thought prompting elicits reasoning in large language models. Advances in neural information processing systems. 2022. Vol. 35, pp. 24824-24837. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.11903>
4. Ho J., Jain A., Abbeel P. Denoising diffusion probabilistic models. Advances in neural information processing systems. 2022. Vol. 33, pp. 6840-6851. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.11239>
5. Lipman Y., Chen R. T., Ben-Hamu H., Nickel M., Le M. Flow matching for generative modeling. arXiv. 2022. arXiv:2210.02747. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.02747>
6. Silver D., Huang A., Maddison C. J., Guez A., Sifre L., Van Den Driessche G.,... Hassabis D. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. Nature. 2026. Vol. 529(7587), pp. 484-489. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature16961>
7. Breiman L. Random forests. Machine learning. 2001. Vol. 45(1), pp. 5-32. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
8. Welleck S., Bertsch A., Finlayson M., Schoelkopf H., Xie A., Neubig G., Kulikov I., Harchaoui Z. From Decoding to Meta-Generation: Inference-time Algorithms for Large Language Models. ArXiv. 2024. abs/2406.16838. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.16838>
9. Balachandran V., Chen J., Chen L., Garg S., Joshi N., Lara Y.,... Yousefi S. Inference-time scaling for complex tasks: Where we stand and what lies ahead. arXiv. 2025. arXiv:2504.00294. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.00294>
10. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. Advances in neural information processing systems. 2012. Vol. 25. DOI: <https://doi.org/10.1145/3065386>
11. Gal Y., Ghahramani Z. Dropout as a bayesian approximation: Representing model uncertainty in deep learning. In international conference on machine learning. PMLR. 2016. pp. 1050-1059. DOI: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3045390.3045502>
12. Brown T., Mann B., Ryder N., Subbiah M., Kaplan J. D., Dhariwal P.,... Amodei D. Language models are few-shot learners. Advances in neural information processing systems. 2020. Vol. 33, pp. 1877-1901. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.14165>
13. Бондар В. В., Бабенко В. Г. Масштабування обчислень під час генерації як універсальний принцип для генеративних моделей. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2025. № 4. С. 229–234. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.048926>
14. Bondar V., Babenko V., Trembovetskyi R., Korobeinyk Y., Dzyuba V. Deep generative models as the probability transformation functions. arXiv. 2025. arXiv:2506.17171. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.17171>
15. Snell C.V., Lee J., Xu K., Kumar A. Scaling LLM Test-Time Compute Optimally can be More Effective than Scaling Model Parameters. ArXiv. 2024. abs/2408.03314. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.03314>
16. Wang X., Wei J., Schuurmans D., Le Q., Chi E., Narang S.,... Zhou D. Self-consistency improves chain of thought reasoning in language models. arXiv. 2022. arXiv:2203.11171. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.11171>
17. Yao S., Yu D., Zhao J., Shafran I., Griffiths T., Cao Y., Narasimhan K. Tree of thoughts: Deliberate problem solving with large language models. Advances in neural information processing systems. 2023. Vol. 36, pp. 11809–11822. DOI: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3666122.3666639>
18. Lightman H., Kosaraju V., Burda Y., Edwards H., Baker B., Lee T.,... Cobbe K. Let's verify step by step. In The Twelfth International Conference on Learning Representations. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.20050>
19. Brown B., Juravsky J., Ehrlich R., Clark R., Le Q. V., Ré C., Mirhoseini A. Large language monkeys: Scaling inference compute with repeated sampling. arXiv. 2024. arXiv:2407.21787. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.21787>
20. Jaech A., Kalai A., Lerer A., Richardson A., El-Kishky A., Low A.,... Metz L. Openai o1 system card. arXiv. 2024. arXiv:2412.16720. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.16720>
21. Guo D., Yang D., Zhang H., Song J., Zhang R., Xu R.,... He Y. Deepseek-r1: Incentivizing reasoning capability in llms via reinforcement learning. Nature. 2025. Vol. 645, pp. 633–638. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09422-z>
22. Muennighoff N., Yang Z., Shi W., Li X. L., Fei-Fei L., Hajishirzi H.,... Hashimoto T. B. s1: Simple test-time scaling. In Proceedings of the 2025 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. 2025. pp. 20286–20332. DOI: <https://doi.org/10.18653/v1/2025.emnlp-main.1025>

23. Hao S., Gu Y., Ma H., Hong J., Wang Z., Wang D., Hu Z. Reasoning with language model is planning with world model. In Proceedings of the 2023 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. 2023. pp. 8154–8173. DOI: <https://doi.org/10.18653/v1/2023.emnlp-main.507>
24. Song Y., Sohl-Dickstein J., Kingma D. P., Kumar A., Ermon S., Poole B. Score-Based Generative Modeling through Stochastic Differential Equations. In International Conference on Learning Representations. 2020. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.13456>
25. Dhariwal P., Nichol A. Diffusion models beat gans on image synthesis. Advances in neural information processing systems. 2021. Vol. 34, pp. 8780-8794. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.05233>
26. Ho J., Salimans T. Classifier-free diffusion guidance. arXiv. 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.12598>
27. Ma N., Tong S., Jia H., Hu H., Su Y. C., Zhang M.,... Xie S. Inference-time scaling for diffusion models beyond scaling denoising steps. arXiv. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.09732>
28. Sun Y., Wang X., Liu Z., Miller J., Efros A., Hardt M. Test-time training with self-supervision for generalization under distribution shifts. In International conference on machine learning. 2020. PMLR. pp. 9229-9248. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.13231>
29. Wang D., Shelhamer E., Liu S., Olshausen B. A., Darrell T. Tent: Fully Test-Time Adaptation by Entropy Minimization. International Conference on Learning Representations. 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.10726>
30. Finn C., Abbeel P., Levine S. Model-agnostic meta-learning for fast adaptation of deep networks. In International conference on machine learning. 2017. PMLR. pp. 1126-1135. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.03400>
31. Sutskever I., Vinyals O., Le Q. V. Sequence to sequence learning with neural networks. Advances in neural information processing systems. 2014. Vol. 27. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.3215>
32. Jumper J. M., Evans R., Pritzel A., Green T., Figurnov M., Ronneberger O., ... Hassabis D. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. Nature. 2021. Vol. 596, pp. 583–589. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03819-2>
33. Li Y., Choi D., Chung J., Kushman N., Schrittwieser J., Leblond R.,... Vinyals O. Competition-level code generation with alphacode. Science. 2022. Vol. 378(6624), pp. 1092-1097. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abq1158>

References

1. Kaplan, J., McCandlish, S., Henighan, T.J., Brown, T.B., Chess, B., Child, R., Gray, S., Radford, A., Wu, J., & Amodei, D. (2020). Scaling Laws for Neural Language Models. ArXiv, abs/2001.08361. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.08361>
2. Hoffmann, J., Borgeaud, S., Mensch, A., Buchatskaya, E., Cai, T., Rutherford, E.,... & Sifre, L. (2022). An empirical analysis of compute-optimal large language model training. Advances in neural information processing systems, 35, 30016-30030. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3600270.3602446>
3. Wei, J., Wang, X., Schuurmans, D., Bosma, M., Xia, F., Chi, E.,... & Zhou, D. (2022). Chain-of-thought prompting elicits reasoning in large language models. Advances in neural information processing systems, 35, 24824-24837. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.11903>
4. Ho, J., Jain, A., & Abbeel, P. (2020). Denoising diffusion probabilistic models. Advances in neural information processing systems, 33, 6840-6851. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.11239>
5. Lipman, Y., Chen, R. T., Ben-Hamu, H., Nickel, M., & Le, M. (2022). Flow matching for generative modeling. arXiv preprint arXiv:2210.02747. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.02747>
6. Silver, D., Huang, A., Maddison, C. J., Guez, A., Sifre, L., Van Den Driessche, G.,... & Hassabis, D. (2016). Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. Nature, 529(7587), 484-489. <https://doi.org/10.1038/nature16961>
7. Breiman, L. (2001). Random forests. Machine learning, 45(1), 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
8. Welleck, S., Bertsch, A., Finlayson, M., Schoelkopf, H., Xie, A., Neubig, G., Kulikov, I., & Harchaoui, Z. (2024). From Decoding to Meta-Generation: Inference-time Algorithms for Large Language Models. ArXiv, abs/2406.16838. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.16838>
9. Balachandran, V., Chen, J., Chen, L., Garg, S., Joshi, N., Lara, Y.,... & Yousefi, S. (2025). Inference-time scaling for complex tasks: Where we stand and what lies ahead. arXiv preprint arXiv:2504.00294. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.00294>
10. Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. Advances in neural information processing systems, 25. <https://doi.org/10.1145/3065386>
11. Gal, Y., & Ghahramani, Z. (2016, June). Dropout as a bayesian approximation: Representing model uncertainty in deep learning. In international conference on machine learning (pp. 1050-1059). PMLR. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3045390.3045502>

12. Brown, T., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J. D., Dhariwal, P.,... & Amodei, D. (2020). Language models are few-shot learners. *Advances in neural information processing systems*, 33, 1877–1901. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.14165>
13. Bondar, V. V., & Babenko, V. G. (2025). Inference-time computational scaling calculations as a universal principle for generative models, (4), 229–234. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.048926>
14. Bondar, V., Babenko, V., Trembovetskyi, R., Korobeinyk, Y., & Dzyuba, V. (2025). Deep generative models as the probability transformation functions. *arXiv preprint arXiv:2506.17171*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.17171>
15. Snell, C.V., Lee, J., Xu, K., & Kumar, A. (2024). Scaling LLM Test-Time Compute Optimally can be More Effective than Scaling Model Parameters. *ArXiv*, abs/2408.03314. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.03314>
16. Wang, X., Wei, J., Schuurmans, D., Le, Q., Chi, E., Narang, S.,... & Zhou, D. (2022). Self-consistency improves chain of thought reasoning in language models. *arXiv preprint arXiv:2203.11171*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.11171>
17. Yao, S., Yu, D., Zhao, J., Shafran, I., Griffiths, T., Cao, Y., & Narasimhan, K. (2023). Tree of thoughts: Deliberate problem solving with large language models. *Advances in neural information processing systems*, 36, 11809–11822. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3666122.3666639>
18. Lightman, H., Kosaraju, V., Burda, Y., Edwards, H., Baker, B., Lee, T.,... & Cobbe, K. (2023, May). Let's verify step by step. In *The Twelfth International Conference on Learning Representations*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.20050>
19. Brown, B., Juravsky, J., Ehrlich, R., Clark, R., Le, Q. V., Ré, C., & Mirhoseini, A. (2024). Large language monkeys: Scaling inference compute with repeated sampling. *arXiv preprint arXiv:2407.21787*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.21787>
20. Jaech, A., Kalai, A., Lerer, A., Richardson, A., El-Kishky, A., Low, A.,... & Metz, L. (2024). Openai o1 system card. *arXiv preprint arXiv:2412.16720*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.16720>
21. Guo, D., Yang, D., Zhang, H., Song, J., Zhang, R., Xu, R.,... & He, Y. (2025). Deepseek-r1: Incentivizing reasoning capability in llms via reinforcement learning. *Nature* 645, 633–638. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09422-z>
22. Muennighoff, N., Yang, Z., Shi, W., Li, X. L., Fei-Fei, L., Hajishirzi, H.,... & Hashimoto, T. B. (2025, November). s1: Simple test-time scaling. In *Proceedings of the 2025 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing* (pp. 20286–20332). <https://doi.org/10.18653/v1/2025.emnlp-main.1025>
23. Hao, S., Gu, Y., Ma, H., Hong, J., Wang, Z., Wang, D., & Hu, Z. (2023, December). Reasoning with language model is planning with world model. In *Proceedings of the 2023 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing* (pp. 8154–8173). <https://doi.org/10.18653/v1/2023.emnlp-main.507>
24. Song, Y., Sohl-Dickstein, J., Kingma, D. P., Kumar, A., Ermon, S., & Poole, B. Score-Based Generative Modeling through Stochastic Differential Equations. In *International Conference on Learning Representations*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.13456>
25. Dhariwal, P., & Nichol, A. (2021). Diffusion models beat gans on image synthesis. *Advances in neural information processing systems*, 34, 8780–8794. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.05233>
26. Ho, J., & Salimans, T. (2022). Classifier-free diffusion guidance. *arXiv preprint arXiv:2207.12598*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.12598>
27. Ma, N., Tong, S., Jia, H., Hu, H., Su, Y. C., Zhang, M.,... & Xie, S. (2025). Inference-time scaling for diffusion models beyond scaling denoising steps. *arXiv preprint arXiv:2501.09732*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.09732>
28. Sun, Y., Wang, X., Liu, Z., Miller, J., Efros, A., & Hardt, M. (2020, November). Test-time training with self-supervision for generalization under distribution shifts. In *International conference on machine learning* (pp. 9229–9248). PMLR. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.13231>
29. Wang, D., Shelhamer, E., Liu, S., Olshausen, B. A., & Darrell, T. (2021). Tent: Fully Test-Time Adaptation by Entropy Minimization. *International Conference on Learning Representations*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.10726>
30. Finn, C., Abbeel, P., & Levine, S. (2017, July). Model-agnostic meta-learning for fast adaptation of deep networks. In *International conference on machine learning* (pp. 1126–1135). PMLR. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.03400>
31. Sutskever, I., Vinyals, O., & Le, Q. V. (2014). Sequence to sequence learning with neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 27. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.3215>
32. Jumper, J. M., Evans, R., Pritzel, A., Green, T., Figurnov, M., Ronneberger, O., ... & Hassabis, D. (2021). Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature*, 596, 583–589. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03819-2>
33. Li, Y., Choi, D., Chung, J., Kushman, N., Schrittwieser, J., Leblond, R.,... & Vinyals, O. (2022). Competition-level code generation with alphacode. *Science*, 378(6624), 1092–1097. <https://doi.org/10.1126/science.abq1158>

Дата першого надходження статті до видання: 12.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

О. В. ВЕРЕТЮК

аспірант кафедри систем автоматизованого проектування
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0009-0009-2340-4458

Н. А. АНДРУЩАК

кандидат технічних наук,
доцент кафедри систем автоматизованого проектування
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0002-8248-404X

ОПТИМІЗАЦІЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ В ДИФУЗІЙНИХ МОДЕЛЯХ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЕСКІЗІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КРИВИХ БЕЗ'Є

У цій статті представлено та обґрунтовано інноваційний підхід до оптимізації складного процесу генерування ескізів як графічного контенту, що є критично важливим етапом для автоматизації процесу малювання. Актуальність роботи продиктована необхідністю зменшення обчислювального навантаження сучасних генеративних моделей при збереженні високої якості вихідного зображення. На основі проведеного аналізу недоліків растрової графіки було вирішено використати альтернативний тип абстрактних даних – криві Без'є, на противагу загальноприйнятим піксельним сіткам. Цей тип даних надає значно ширші можливості в побудові невеликих, але ефективних моделей з більш якісним та масштабованим результатом генерування. В результаті експериментів було отримано модель, яка здатна успішно генерувати нові дані з вхідного ескізу, а також детально проаналізовано показники стабільності та варіативності процесу генерування. У роботі проведено ґрунтовний порівняльний аналіз кількості параметрів нейронної мережі, необхідних для генерації графіки у піксельному форматі та за допомогою кривих Без'є. Встановлено, що використання кривих суттєво зменшує кількість вхідних параметрів та обчислювальну складність мережі. Наприклад, для створення моделі при генеруванні піксельного зображення 32×32 потрібно 1024 вхідні параметри (якщо пікселі представлені у чорно-білому форматі) або 3072 (якщо у форматі RGB). Це значно перевищує показник у понад 800 параметрів моделі, яка використовувалась для генерування масштабованих кривих у даному дослідженні. Ключовою перевагою нового підходу визначено забезпечення ідеальної масштабованості: згенеровані дані можуть бути легко збільшені або зменшені до будь-якого розміру з мінімальною втратою якості, що є неможливим у традиційних піксельних (растрових) форматах. Також варто зауважити, що якість згенерованого зображення визначається лише потенціалом архітектури нейромережі, а не обмеженням фіксованої роздільної здатності, притаманним піксельним форматам.

Ключові слова: оптимізація, нейронні мережі, графічний контент, масштабованість, криві Без'є.

O. V. VERETIUK

Postgraduate Student at the Department of Computer Design Systems
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0009-0009-2340-4458

N. A. ANDRUSHCHAK

PhD, Associate Professor at the Department of Computer Design Systems
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0002-8248-404X

OPTIMIZATION OF NEURAL NETWORKS IN DIFFUSION MODELS FOR SKETCH GENERATION USING BEZIER CURVE

This article presents a comprehensive study regarding an innovative approach to optimising the computational process of generating artistic sketches, specifically focusing on the significant task of automating digital drawing workflows. Following a detailed and rigorous analysis of existing methodologies, a strategic decision was made to utilize parametric curve-based abstract data structures – specifically Bézier curves – as a superior alternative to the traditional, widely utilized raster pixel representations. This fundamental transition to using mathematical curve descriptions provides significantly broader opportunities for constructing compact, efficient models that yield higher quality and fully scalable generation results. Through this research, a robust model capable of generating novel geometric data from an input



© О. В. Веретюк, Н. А. Андрущак, 2026

Стаття поширюється на умовах відкритої ліцензії CC BY 4.0

sketch was obtained, and the stability, consistency, and variability of the generation process were rigorously analyzed to ensure reliability. A critical component of this study involves a comparative analysis of the neural network parameters required for generating graphics in standard pixel formats versus the proposed Bézier curve method. The empirical results demonstrated that the employment of Bézier curves significantly reduces both the number of necessary input parameters and the overall computational complexity of the neural network architecture. To illustrate this computational disparity, creating a model to generate a standard 32×32 pixel image requires 1,024 input parameters (if the pixels are represented in black and white format) or 3,072 parameters (if in RGB format). In stark contrast, the model utilized to generate scalable curves requires only 800 parameters, representing a substantial reduction in computational load while maintaining structural integrity. The pivotal advantage of this new approach lies in its provision of perfect scalability; unlike traditional pixel (raster) formats, the generated data can be effortlessly enlarged or reduced to any dimension with zero loss of visual fidelity. Consequently, the quality of the generated image is no longer bound by the fixed resolution limitations inherent in raster formats but is determined solely by the potential and sophistication of the neural network architecture.

Key words: optimization, neural networks, graphic content, scalability, Bezier curves.

Постановка проблеми

Використання генеративного штучного інтелекту для генерування графічного контенту стає більш популярним з кожним днем. Проте, його використання у вирішенні практичних проблем є все ще обмеженим. Однією з проблем є висока ціна тренування та використання таких моделей, що зменшує доступність для роботи з цими технологіями для малих компаній або досліджень з малими бюджетами. Особливо це стосується тих індустрій, які пов'язані з процесом малювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Можливості використання штучного інтелекту для покращення або автоматизації процесу генерування контенту для різних індустрій активно досліджується [1][2]. В основі сучасних моделей для генерації графічного контенту лежить методологія дифузійних моделей [3], які довели свою ефективність в генеруванні високоякісного контенту.

В той самий час проводяться дослідження вартості тренування та використання моделей, які показують тенденцію до збільшення вартості [4], що робить важливим, як пошук підходів оптимізації так й практичного використання.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розробка підходу для зменшення складності нейромережі у генеративних моделях, при збереженні якості та можливостей для практичного застосування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Використання штучного інтелекту в різних його формах стає більш звичним та популярнішим з кожним днем. Однією з галузей штучного інтелекту, яка отримала найбільший поштовх останні роки став генеративний штучний інтелект. [5][6]

Генеративний штучний інтелект – це методологія штучного інтелекту, яка зосереджена на моделях та методах, які здатні породжувати новий контент відповідно, до даних, на яких такі моделі тренуються. Сьогодні існує доволі багато різних моделей, проєктів та інструментів для генерування різного типу даних: ChatGPT[7] для генерування та аналізу текстів, DALL-E[8] для створення високоякісних зображень, ElevenLabs[9] для створення аудіо та музики, Sora[10] для відео. Це лише невеликий перелік існуючих досягнень, який поповнюється кожен день, як схожими проєктами так і новими рішеннями, які розширюють можливості штучного інтелекту.

Однією з найбільш потенціальних галузей, які стрімко розвиваються, є власне генерування графічного контенту в різних його формах. Сьогодні існує великий вибір, як у виборі генеративних моделей для дослідження, так й у готових інструментах, де будь хто може створити нове зображення або відео ввівши декілька слів у текстове поле. Існують два основні типи моделей в генеруванні такого типу контенту. Генеративні змагальні мережі (GAN) [11], які довгий час були основним підходом, та дифузійні моделі [12], які набули популярності в останні роки, та на яких базується більшість відомих інструментів для генерування зображень та відео.

Як відомо, генеративні змагальні мережі мають архітектуру, яка складається з двох мереж, генератора та дискримінатора. Генератор пробує згенерувати контент, а дискримінатор намагається визначити чи контент відповідає дійсності. Ці дві мережі навчаються одночасно і з часом тренування генератор починає надавати все кращі та кращі екземпляри. Проте цей підхід є повноцінною чорною коробкою, процес генерування якої доволі важко контролювати, а значення похибки, яке визначається за допомогою дискримінанта при тренуванні, може не бути репрезентативною, адже за великим рахунком залежить виключно від здатності моделі дискримінанта вчитись в тому ж темпі, що й модель генератора. В основі дифузійних моделей лежать два процеси: руйнація вхідних даних та їх відновлення за певну кількість кроків. Руйнація здійснюється за допомогою додавання випадкового шуму, який часто береться з гаусового розподілу. Цей шум додається визначену кількість разів, до того моменту поки вхідні дані самі не перетворяться в гаусовий шум. Відновлення ж відбувається за рахунок передбачення

стану даних в зворотньому порядку. Дуже часто передбачається власне шум, який додавався на тому чи іншому кроці для виведення результату. В основі цих процесів лежить математичний апарат, що є важливою відмінністю від змагальних мереж. Це дозволяє отримати кращий контроль над процесами генерування, а похибка обчислюється з виведених формул

Сьогодні вже описані різні типи дифузійних моделей, які мають свої переваги та недоліки. В даній статті використовується класична модель, яка носить назву Імовірнісна дифузійна модель з усуненням шуму або Denoising Diffusion Probabilistic Models (DDPM)[13] в оригіналі. В її основі, як й в інших дифузійних моделях, лежать три основні формули: формула руйнації, формула генерування та формула тренування.

Для прикладу, формулу руйнації або накладання шумів можна записати із використанням рівняння 1, яке може бути записано як:

$$x_t = \sqrt{1-b_t} \cdot x_{t-1} + \sqrt{b_t} \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

де x_t – зображення (або дані) після додавання шуму, b_t – коефіцієнт шуму, x_{t-1} – зображення (або дані) після додавання шуму на кроці $t-1$, ε – шум отриманий з гаусового розподілу

Проте на практиці використовується оптимізована формула, яка дозволяє опинитись на обраному кроці руйнування без проходження попередніх кроків. Це дозволяє заощадити, як використання обчислювальних ресурсів, так й часу тренування. Ця формула може бути записана як:

$$x_t = \sqrt{\bar{a}_t} \cdot x_0 + \sqrt{1-\bar{a}_t} \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

де x_t – зображення (або дані) після додавання шуму, $\bar{a}_t$ – накопичений коефіцієнт збереження, x_0 – початкове зображення (або дані), ε – шум отриманий з гаусового розподілу

В основі цієї формули лежить накопичений коефіцієнт збереження, який дозволяє оминати додаткових кроків при обчисленні стану зображення на тому чи іншому кроці руйнації.

Формула для накопичуваного коефіцієнту збереження

$$\bar{a}_t = \prod_{s=1}^t a_s, \quad (3)$$

де $\bar{a}_t$ – накопичений коефіцієнт збереження, a_s – коефіцієнт збереження на кроці s

Формула коефіцієнту збереження

$$a_t = 1 - b_t, \quad (4)$$

де a_t – коефіцієнт збереження, b_t – коефіцієнт шуму

Формула генерації нових даних

$$x_{t-1} = \frac{1}{\sqrt{a_t}} \left(x_t - \frac{b_t}{\sqrt{1-\bar{a}_t}} \varepsilon(x_t, t) \right) + \sigma_t z, \quad (5)$$

де x_{t-1} – зображення (або дані) отримані з даних на кроці t , x_t – поточне зображення (або дані), $\bar{a}_t$ – накопичений коефіцієнт збереження, $\varepsilon(x_t, t)$ – передбачений шум (вихід з нейромережі), σ_t – значення наближене до квадратного кореню з b_t . Варто зауважити, що в оригіналі для σ_t використовується окрема формула, яка виводиться як з b_t так й з $\bar{a}_t$, проте це спрощення не дуже сильно впливає на кінцевий результат [14], тому було вирішено обрати спрощений варіант.

Формула втрат (середньоквадратичне відхилення), яка мінімізується під час навчання

$$L_{simple} = E_{t, x_0, \varepsilon} \left[\left\| \varepsilon - \varepsilon_0(x_t, t) \right\|^2 \right], \quad (6)$$

де $E_{t, x_0, \varepsilon}$ – усереднення за випадковими вибірками (оцінка Монте-Карло) часу t , початкового прикладу x_0 та шуму ε , x_0 початкове зображення (дані) з датасету, t – крок дифузії, ε – реальний шум, який додається під час процесу шумування, x_t – зашумлена версія x_0 на кроці t , $\varepsilon_0(x_t, t)$ – шум, який передбачає нейромережа.

Як відомо звичайним типом даних, який використовується в генеративних мережах є піксель. Це найпопулярніший тип представлення зображень та графічного контенту. Будь який контент може бути представлений набором пікселів від фотографій до малюнків, що дає можливість швидко сформувати тренувальний набір даних та почати роботу над моделлю. Проте незважаючи на універсальність цього типу даних в нього є одна велика проблема – цей тип даних не є оптимізованим, адже залежить від розширення, яке визначає як якість так й наскільки великим може бути зображення. Більше того, тренування моделі зазвичай має обмеження: одна модель – одне розширення для невеликих моделей, адже нейронні мережі мають визначену кількість параметрів на вході й на виході, що буде відповідати кількості пікселів. Проте, варто зауважити, що існують рішення, які дозволяють мати можливість вибору розширення при генеруванні, але це вимагає великих обчислювальних потужностей як при

навчання так й при генеруванні, що може бути неефективним використанням ресурсів для вирішення тих чи інших задач.

Використання більш абстрактних типів даних, може бути більш доцільним для вирішення спеціалізованих задач та проблем. Наприклад криві Без'є можуть бути ефективним та оптимізованим типом для даних для роботи з ескізами, що може бути корисним в спрощенні та пришвидшенні процесу малювання.

Опис експерименту

В межах статті використовувалась нейронна мережа з 800 вхідними та 800 вихідними параметрами, що відповідає 400 точкам, які складаються з двох координат, та є доволі низькою кількістю параметрів для генеративної мережі. В той час для генерування картинки навіть розміром 32X32 потрібно 1024 параметрів, якщо пікселі представлені чорно-білому форматі, або 3072, якщо у форматі RGB.

На рис. 1 представлено відображення одного ескізу, при використанні піксельного типу даних в розширенні 32X32, та кривих Без'є, загальна кількість точок, яких не перевищує 800.

Варто зауважити, що для того, щоб мати можливість показати зображення в достатньому розмірі, треба було перевести зображення у формат 32X32, а потім до формату 256X256, що сприяло ще більшій деградації якості. В той самий час масштабування не є проблемою для кривих Без'є, адже вони складаються з точок з координатами, що дозволяє збільшувати або зменшувати зображення з мінімальними втратами якості та даних. В той самий час, якщо є потреба в роботі з більш сучасними розширеннями, як наприклад 1280X720, кількість параметрів буде дорівнювати 921 600 для чорно-білих пікселів, або 2 764 800 для пікселів у форматі RGB, що багатократно збільшує складність нейронної мережі, та кількість обчислювальних ресурсів потрібних для тренування.

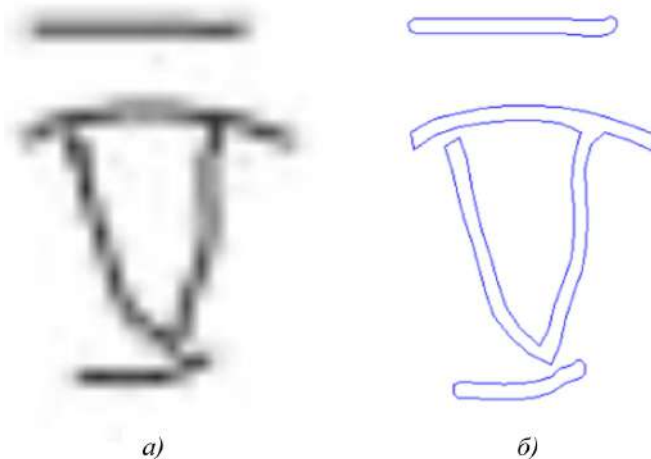


Рис. 1. Порівняння зображень: а) у піксельному форматі, б) у форматі кривих Без'є

Набір даних був побудований на основі малюнків очей в популярному японському анімаційному стилі. Однією з найбільших проблем при роботі з даними є їх переведення у потрібний формат. На противагу піксельним зображенням, які є у великій кількості в мережі інтернет, графічні дані у вигляді точок або кривих Без'є важко знайти у вільному доступі. Було вирішено використати програмний підхід, який дозволяє перевести більшу частину зображення у формат ескізу, який надалі може бути оброблений за допомогою бібліотеки для роботи з графічним контентом OpenCV для видобутку кривих.

Для переведення даних у ескіз був використаний відкритий інструмент[15], який використовує GAN моделі, щоб прибрати кольори, зайві деталі й залишає зображення, яке складається з чорних ліній на білому фоні. Цей інструмент базується на статті, в якій досліджують можливості генерації фото з вхідного ескізу[16].

Далі за допомогою бібліотек OpenCV і skimage, та з використанням розробленого алгоритму виділяється набір кривих, кожна з яких далі розділяється на менші криві, які складаються з чотирьох точок. Алгоритм дозволяє обирати максимальну кількість кривих та точок, з яких складаються криві, на які можна розділити отримане зображення, це дозволяє регулювати якість та деталізованість даних. Приклади переведення піксельного ескізу в криві різної деталізованості можна побачити на рис. 3.

Надалі, ці дані вже можна використовувати при тренуванні дифузійної моделі. Проте при першому тренуванні моделі була знайдена велика проблема пов'язана з якістю згенерованих результатів. Якщо лишити формат даних, коли кожна окрема крива передбачається окремо, результат генерування буде складатись з рваних кривих. Це пов'язано, зі специфікою роботи генеративних мереж. Вони насправді не генерують дані, а лише апроксимують можливе місце знаходження даних. Відповідно спільні точки між кривими, можуть бути нескінченно близько, проте між ними все одно буде лишатись відстань, яка зробить деградацію відображення більшою при

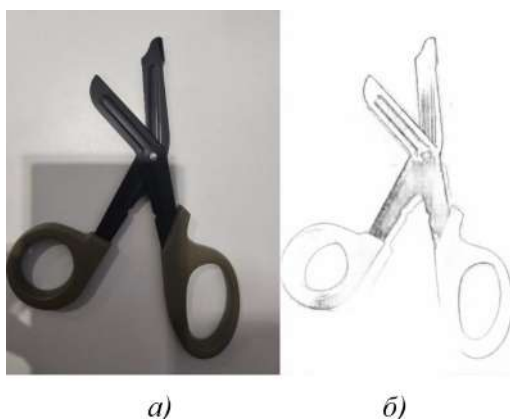


Рис. 2. Приклад переведення піксельного зображення у формат ескізу, а) оригінальне зображення, б) зображення перетворене у ескіз

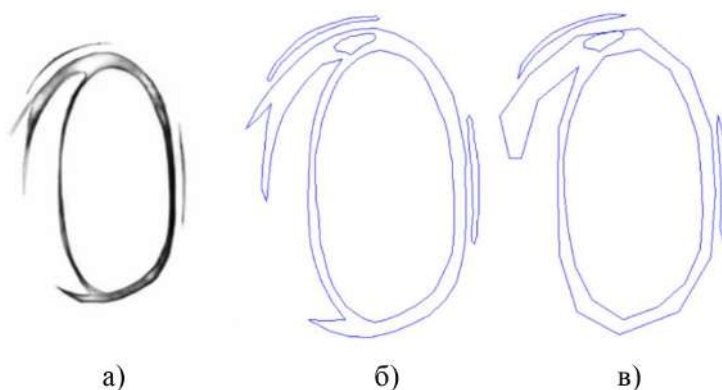


Рис. 3. Приклад а) оригінального ескізу, б) ескіз з кривих, які були розділені на найбільше ніж 5 кривих та 100 точок в кожній, в) ескіз намальований з кривих, які були розділені на найбільше ніж 5 кривих та 30 точок в кожній

масштабуванні картинки. В якості рішення цієї проблеми, було запропоновано перетворити всі криві на одну велику криву, яка складається з усіх точок, які присутні на ескізі. Більше того цей підхід дозволяє, ще більше оптимізувати дані, адже спільні точки будуть представлені лише один раз. Для отримання можливості відновлення минулого формату даних, індекси розділення кривих та спільних точок зберігаються в тимчасовій базі даних.

На рис. 4 можна побачити приклад розірваних або накладених одну на одну кривих у випадку використання окремих кривих, як вхідних та вихідних даних при генеруванні.

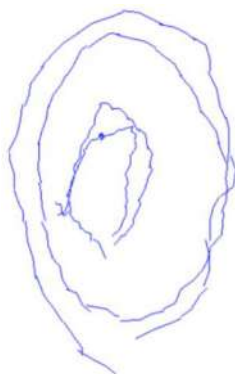


Рис. 4. Приклад згенерованого зображення при генеруванні окремих кривих

Було підготовлено набір даних, який складається з 213 ескізів очей різної деталізованості у форматі японського анімаційного стилю.

Для тренування генеративних моделей зазвичай використовується інфраструктура побудована на відеокартах, адже вони надають набагато більший обчислювальний потенціал для тренування нейронних мереж ніж

процесори. Сьогодні існує велика кількість різних сервісів, які надають в оренду різні типи відеокарт для тренування. Одним з таких сервісів є Google Colab. Цей інструмент надає обмежений вибір інфраструктури для тренування, проте підтримує формат Jupyter Notebook, який дозволяє швидко побудову програмного забезпечення для тренування й тестування моделі в межах сервісу.

В наслідок експериментування з параметрами дифузійних моделей було натреновано декілька різних екземплярів. Результати генерування показані нижче відносяться до останньої моделі та є найбільш вдалим. Параметри моделі, які були використані: кількість кроків $T = 500$, верхня межа $b_t = 0.0005$, нижня межа $b_t = 0.000001$ та кількість тренувальних епох – 500 000. Нейронна мережа має підтримку 800 вхідних та вихідних параметрів, які представляють собою координати 400 окремих точок.

Перевірка отриманих результатів

Для дифузійних моделей існує два типи перевірки якості. Перший це використання числового параметра, який розраховується під час тренування й визначає похибку (MSE) при передбаченні шуму, який має бути прибраний від даних, які передбачаються. Графік зменшення похибки показаний на рис. 5. Другим є прямий візуальний, тобто оцінка якості згенерованого контенту людиною.

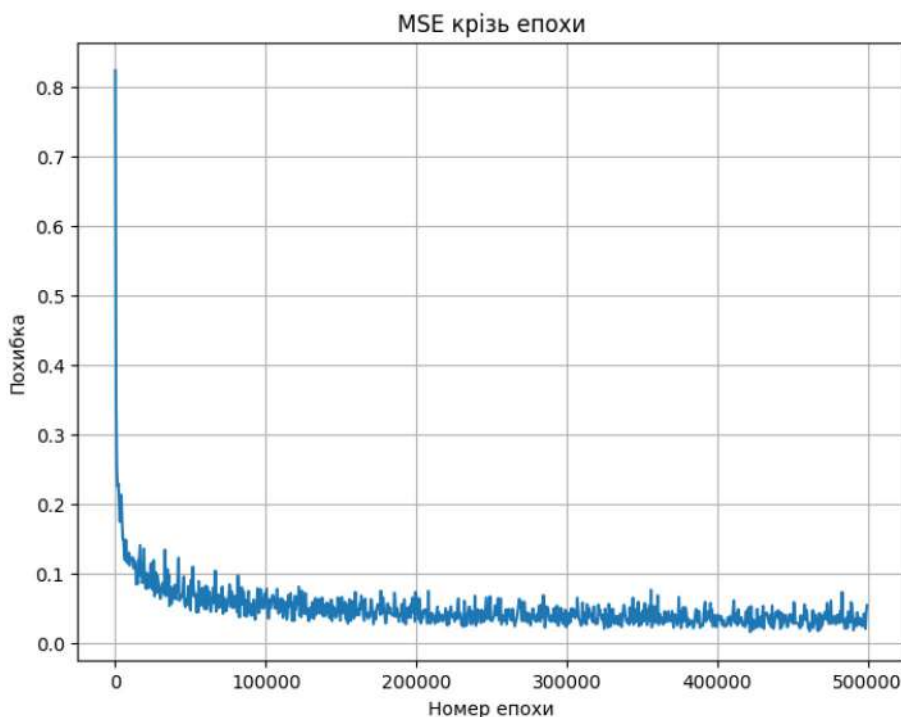


Рис. 5. Графік зменшення похибки під час тренування – треба завжди вказувати розмірності на графіку

Як видно з рис. 5, похибка різко зменшується на початкових 50 000 епохах та має певну тенденцію зменшення похибки, але в результаті виходить на певне плато. Фінальна похибка – 0.05413289368, в той час як початкова – 0.8232346177. Відповідно відбулось покращення точності в ~ 16 разів. Проте в генеративних мережах так чи інакше числова похибка може не бути репрезентативною, тому вимагається візуальна перевірка принаймні декількох результатів генерування. Нижче представлені результати генерування з вхідного ескізу в чотирьох варіантах. Кожен екземпляр має вхідне зображення та два згенерованих з нього, що потрібно для оцінки стабільності та різноманітності генерування. Результати генерування представлені на рис 6, 7, 8, 9.

На основі результатів генерування можна зробити перелік висновків. Перший, що модель повторює риси оригінального ескізу, але додає додаткові деталі. Другий це стабільність вихідних результатів генерування. Можна побачити, що ескізи згенеровані з одного зображення мають багато схожих рис, але не є ідентичні. Це може бути важливою властивістю при роботі з ескізами, адже дозволяє мати більший контроль над процесом генерування, що є важливим для практичного застосування. Варто зауважити, що випадковість генерування можна збільшити, якщо змінити верхню та нижню межу b_t . Третій це здатність моделі розуміти де знаходяться нульові значення. Як було описано вище, ця модель має 800 вхідних та вихідних параметрів, тобто здатна працювати не більш ніж з 400 точками. Проте різні вхідні ескізи можуть мати різну кількість точок після етапу обробки. Ці точки, які не є задіяними в процесі генерації модель накопичує біля нуля, або в лівій верхній частині згенерованих зображень. Це важливо, адже робить модель більш універсальною, адже дає можливість гнучкого збільшення чи зменшення

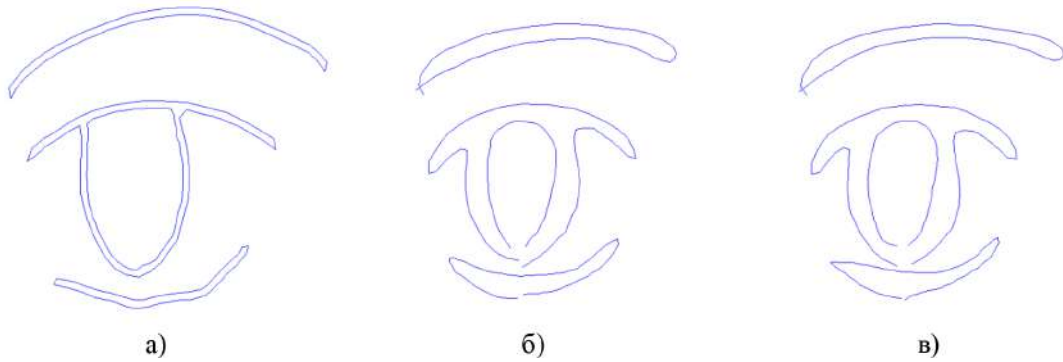


Рис. 6. Результат генерування а) оригінальний ескіз б) перший згенерований ескіз
в) другий згенерований ескіз

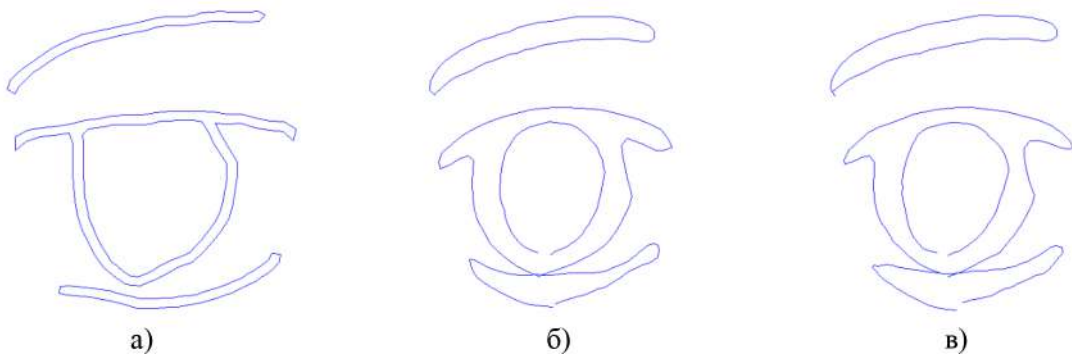


Рис. 7. Результат генерування а) оригінальний ескіз б) перший згенерований ескіз
в) другий згенерований ескіз

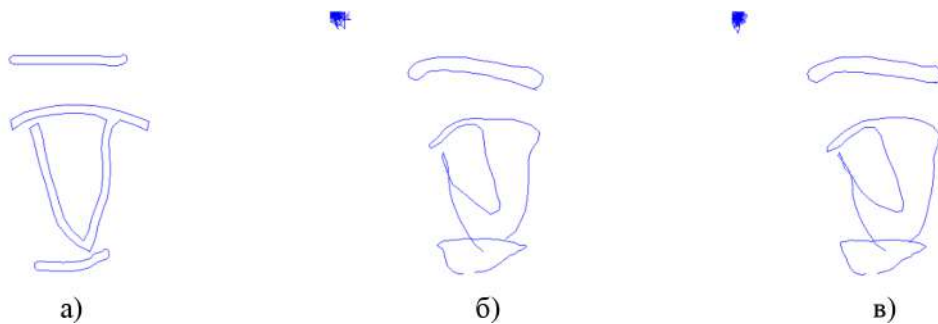


Рис. 8. Результат генерування а) оригінальний ескіз б) перший згенерований ескіз
в) другий згенерований ескіз

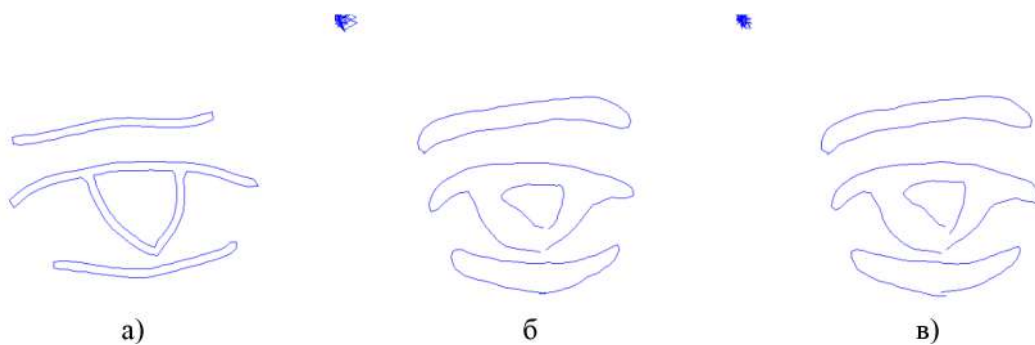


Рис. 9. Результат генерування а) оригінальний ескіз б) перший згенерований ескіз
в) другий згенерований ескіз

масштабів генерування незалежно від розширення екрану. Це дозволяє отримати якісні результати генерування для моделей невеликого розміру, що неможливо при використанні піксельного формату даних.

Варто окремо відзначити ціну тренування цієї моделі. Google Colab використовує обчислювальний блок, як одиницю вимірювання витрат на тренування. Загалом тренування зайняло ~36 обчислювальних блоків. Ціна одного обчислювального блока на момент написання статті складає близько 5 гривень, відповідно ціна вихідної моделі є 180 гривень. Також варто зауважити, що кількість даних, яка було використана для тренування моделі є доволі малою. Тому зважаючи на малу ціну та обмежений набір даних результати генерування можна вважати вдалим.

Є декілька можливих рішень для покращення якості генерування: збільшення набору тренувальних даних та покращення його якості, збільшення складності моделі за рахунок внутрішніх шарів нейронної мережі та збільшення використання обчислювальних блоків.

На рис. 10 можна побачити приклад згенерованих зображень[17] в масштабі 32X32. Для генерування цих зображень використовувалась модель, яка має 3072 вхідних та вихідних параметрів, що в рази більше ніж в моделі, яка працює з кривими. Проте незважаючи на більшу кількість вхідних параметрів є перелік проблем: результати є розмитими на противагу точному відображенню при використанні кривих, їх неможливо масштабувати без великої втрати якості, для збільшення якості зображень треба збільшити складність вхідного та вихідного шару нейронної мережі, що в той самий час вимагатиме набагато складнішої внутрішньої архітектури нейронної мережі не тільки для збільшення якості генерування, а й для підтримки більшої кількості вхідних параметрів. Збільшення розширення згенерованого зображення до сучасних стандартів вимагатиме дуже глибоку й комплексну архітектуру для нейромережі тільки для того, щоб мати можливість опрацьовувати велику кількість вхідних та вихідних параметрів. Більше того при роботі з ескізами велика частина пікселів не буде задіяна в генеруванні, а отже сприятиме неефективному використанню обчислювальних ресурсів.



Рис. 10. Результат генерування в піксельному форматі

Висновки

У ході проведеного дослідження було запропоновано підхід для оптимізованого та якісного генерування графічного контенту у дифузійних моделях. Цей підхід базується на використанні кривих Без'є як основного типу даних на противагу широко використовуваним пікселям. Реалізація та експериментальні дослідження були проведені з використанням мов Python та бібліотек PyTorch, pandas, OpenCV та skimage. Як середовище тренування та розробки використовувався Google Colab з Jupyter Notebook. У процесі експериментів досліджувалось можливість використання кривих як типу даних та які оптимізаційні можливості це дає.

Аналіз результатів показав, що дифузійні моделі можуть ефективно використовуватись для генерації даних у форматі кривих Без'є. Ключовою перевагою цього підходу є значне зменшення кількості параметрів моделі та обчислювальної складності. Для порівняння: якщо генерація растрового зображення 32×32 вимагає 1024 (якщо пікселі у чорно-білому форматі) або 3072 (RGB) параметри, то для моделі, що генерує криві, було достатньо лише 800 параметрів. Це дозволяє збільшувати якість згенерованого контенту виключно за рахунок ускладнення архітектури нейромережі, а не через збільшення обсягу вхідних/вихідних даних, як у піксельних форматах. Таким чином, якість обмежується лише потенціалом моделі, а не фіксованою роздільною здатністю, та забезпечує ідеальну масштабованість результату без втрати якості.

Ефективність підходу було підтверджено внаслідок експериментів та порівняння результатів генерування при використанні кривих та при використанні пікселів. Також було окреслено додаткові кроки, які можуть призвести до поліпшення моделі та результатів її генерування.

Результати описані в цій статті доводять важливість використання альтернативних типів даних для практичного застосування генеративних мереж в таких індустріях як анімація, малювання та дизайн.

Список використаної літератури

1. Hutson, J., & Robertson, B. (2023). A Matter of Perspective: A Case Study in the Use of AI-Generative Art in the Drawing Classroom. *International Journal of New Media, Technology & the Arts*, 18.
2. Porvari, E. (2024). Exploring the potential of AI utilization in the interpretation and digitization of legacy drawings.
3. Yang, L., Zhang, Z., Song, Y., Hong, S., Xu, R., Zhao, Y.,... & Yang, M. H. (2023). Diffusion models: A comprehensive survey of methods and applications. *ACM computing surveys*, 56(4), 1–39.
4. Cottier, B., Rahman, R., Fattorini, L., Maslej, N., Besiroglu, T., & Owen, D. (2024). The rising costs of training frontier AI models. *arXiv preprint arXiv:2405.21015*.
5. Mudrinić, D., & Šoda, I. (2024, November). The Rise of Generative Artificial Intelligence in Business. In 2024 IEEE 17th International Scientific Conference on Informatics (Informatics) (pp. 493–498). IEEE.
6. Kusetogullari, A., Kusetogullari, H., Andersson, M., & Gorschek, T. (2025). GenAI in entrepreneurship: A systematic review of generative artificial intelligence in entrepreneurship research: Current issues and future directions. *arXiv preprint arXiv:2505.05523*.
7. Zhang, M., & Li, J. (2021). A commentary of GPT-3 in MIT Technology Review 2021. *Fundamental Research*, 1(6), 831–833.
8. Puteikis, K., & Mameniškienė, R. (2024). Artificial intelligence: Can it help us better grasp the idea of epilepsy? An exploratory dialogue with ChatGPT and DALL·E 2. *Epilepsy & Behavior*, 156, 109822.
9. Liu, Y., Zhang, K., Li, Y., Yan, Z., Gao, C., Chen, R.,... & Sun, L. (2024). Sora: A review on background, technology, limitations, and opportunities of large vision models. *arXiv preprint arXiv:2402.17177*.
10. Samson, G. (2025, June). Perspectives on Generative Sound Design: A Generative Soundscapes Showcase. In *Arts* (Vol. 14, No. 3, p. 67). MDPI.
11. Goodfellow, I. J., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S.,... & Bengio, Y. (2014). Generative adversarial nets. *Advances in neural information processing systems*, 27.
12. Sohl-Dickstein, J., Weiss, E., Maheswaranathan, N., & Ganguli, S. (2015, June). Deep unsupervised learning using nonequilibrium thermodynamics. In *International conference on machine learning* (pp. 2256–2265). pmlr.
13. Ho, J., Jain, A., & Abbeel, P. (2020). Denoising diffusion probabilistic models. *Advances in neural information processing systems*, 33, 6840–6851.
14. Nichol, A. Q., & Dhariwal, P. (2021, July). Improved denoising diffusion probabilistic models. In *International conference on machine learning* (pp. 8162–8171). PMLR.
15. Xiang, X., Liu, D., Yang, X., Zhu, Y., & Shen, X. (2021). Anime2Sketch: A Sketch Extractor for Anime Arts with Deep Networks [Computer software]. GitHub. <https://github.com/Mukosame/Anime2Sketch>
16. Xiang, X., Liu, D., Yang, X., Zhu, Y., Shen, X., & Allebach, J. P. (2022). Adversarial open domain adaptation for sketch-to-photo synthesis. In *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision* (pp. 1434–1444).
17. Веретюк, О., Огерук, Б., & Андрущак, Н. (2025). Використання шумів для стабільного генерування зображень у дифузійних моделях. Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 7(1), 113–123. <https://doi.org/10.23939/cds2025.01.113>

References

1. Hutson, J., & Robertson, B. (2023). A Matter of Perspective: A Case Study in the Use of AI-Generative Art in the Drawing Classroom. *International Journal of New Media, Technology & the Arts*, 18.
2. Porvari, E. (2024). Exploring the potential of AI utilization in the interpretation and digitization of legacy drawings.
3. Yang, L., Zhang, Z., Song, Y., Hong, S., Xu, R., Zhao, Y.,... & Yang, M. H. (2023). Diffusion models: A comprehensive survey of methods and applications. *ACM computing surveys*, 56(4), 1–39.
4. Cottier, B., Rahman, R., Fattorini, L., Maslej, N., Besiroglu, T., & Owen, D. (2024). The rising costs of training frontier AI models. *arXiv preprint arXiv:2405.21015*.
5. Mudrinić, D., & Šoda, I. (2024, November). The Rise of Generative Artificial Intelligence in Business. In 2024 IEEE 17th International Scientific Conference on Informatics (Informatics) (pp. 493–498). IEEE.
6. Kusetogullari, A., Kusetogullari, H., Andersson, M., & Gorschek, T. (2025). GenAI in entrepreneurship: A systematic review of generative artificial intelligence in entrepreneurship research: Current issues and future directions. *arXiv preprint arXiv:2505.05523*.
7. Zhang, M., & Li, J. (2021). A commentary of GPT-3 in MIT Technology Review 2021. *Fundamental Research*, 1(6), 831–833.

8. Puteikis, K., & Mameniškienė, R. (2024). Artificial intelligence: Can it help us better grasp the idea of epilepsy? An exploratory dialogue with ChatGPT and DALL·E 2. *Epilepsy & Behavior*, 156, 109822.
9. Liu, Y., Zhang, K., Li, Y., Yan, Z., Gao, C., Chen, R.,... & Sun, L. (2024). Sora: A review on background, technology, limitations, and opportunities of large vision models. *arXiv preprint arXiv:2402.17177*.
10. Samson, G. (2025, June). Perspectives on Generative Sound Design: A Generative Soundscapes Showcase. *In Arts* (Vol. 14, No. 3, p. 67). MDPI.
11. Goodfellow, I. J., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S.,... & Bengio, Y. (2014). Generative adversarial nets. *Advances in neural information processing systems*, 27.
12. Sohl-Dickstein, J., Weiss, E., Maheswaranathan, N., & Ganguli, S. (2015, June). Deep unsupervised learning using nonequilibrium thermodynamics. In *International conference on machine learning* (pp. 2256–2265). pmlr.
13. Ho, J., Jain, A., & Abbeel, P. (2020). Denoising diffusion probabilistic models. *Advances in neural information processing systems*, 33, 6840–6851.
14. Nichol, A. Q., & Dhariwal, P. (2021, July). Improved denoising diffusion probabilistic models. In *International conference on machine learning* (pp. 8162–8171). PMLR.
15. Xiang, X., Liu, D., Yang, X., Zhu, Y., & Shen, X. (2021). Anime2Sketch: A Sketch Extractor for Anime Arts with Deep Networks [Computer software]. GitHub. <https://github.com/Mukosame/Anime2Sketch>
16. Xiang, X., Liu, D., Yang, X., Zhu, Y., Shen, X., & Allebach, J. P. (2022). Adversarial open domain adaptation for sketch-to-photo synthesis. In *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision* (pp. 1434–1444).
17. Veretiuk, O., Oheruk, B., & Andrushchak, N. (2025). Using noises for stable image generation in diffusion models. *Computer Science and Systems*, 7(1), 113–123. <https://doi.org/10.23939/cds2025.01.113>

Дата першого надходження статті до видання: 17.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

С. М. ВОЛЯНСЬКИЙ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електричної інженерії та роботизованих комплексів
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
ORCID: 0000-0001-7922-0441

С. В. РУДЕНКО

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри управління логістичними системами і проектами
Одеський національний морський університет
ORCID: 0000-0002-1671-605X

Л. О. ДОБРОВОЛЬСЬКА

асистент кафедри судноводіння і морської безпеки
Одеський національний морський університет
ORCID: 0009-0000-1330-4087

А. В. КОЗАЧУК

асистент кафедри судноводіння і морської безпеки
Одеський національний морський університет
ORCID: 0009-0001-3155-0983

ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОПЕРАТОРНА МЕТОДОЛОГІЯ ДИНАМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ АВТОНОМНИХ МОРСЬКИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

У статті розроблено функціонально-операторну методологію динамічного моделювання автономних морських технічних систем як розподілених ергатичних об'єктів, стан яких еволюціонує у гільбертовому просторі. Запропоновано математичний апарат, який базується на постановці задачі Коші для абстрактного рівняння еволюції з операторною матричною структурою, яка враховує інерційні, дисипативні та керуючі складові системи. Така постановка дозволяє розглядати автономний морський технічний засіб як єдину багаторівневу систему, у якій навігаційні, енергетичні, інформаційні та процеси керування описуються в межах спільного простору станів. Доведено коректність задачі на основі теорії сильно неперервних напівгруп та умов максимальної дисипативності оператора, що гарантує існування та єдиність слабого розв'язку еволюційного рівняння. Побудовано енергетичний функціонал, який забезпечує аналіз стійкості системи та дозволяє дослідити її асимптотичну поведінку за відсутності зовнішніх збурень. Отримані результати формують теоретичне підґрунтя для інтерпретації втрати стійкості системи як передумови виникнення небезпечних режимів функціонування автономних морських платформ. Виконано спектральну декомпозицію оператора, що дало змогу перейти до модального представлення динаміки та встановити зв'язок між спектральною структурою системи та багатомасштабними режимами руху. Показано, що геометричні властивості навігаційних траєкторій, зафіксованих у системах AIS та ECDIS, можуть бути інтерпретовані як проєкція внутрішньої динаміки автономної системи, що відкриває можливості використання фрактально-спектральних характеристик як індикаторів режимів функціонування та рівня навігаційного ризику. Отримані результати формують універсальний математичний каркас для побудови інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, ризик-орієнтованого управління та подальшої інтеграції фрактально-спектрального аналізу в задачах автономної навігації.

Начало формы

Конец формы

Ключові слова: автономні морські технічні системи; функціонально-операторний підхід; рівняння еволюції; гільбертовий простір; сильно неперервна напівгрупа; енергетичний функціонал; спектральна декомпозиція; стійкість динамічних систем; математичне моделювання; ризик-орієнтоване управління.



S. M. VOLYANSKIY

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electrical Engineering of Ship
and Robotic Complexes
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
ORCID: 0000-0001-7922-0441

S. V. RUDENKO

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Management in Logistics Systems and Projects
Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-1671-605X

L. O. DOBROVOLSKA

Assistant Professor at the Department of Navigation and Maritime Safety
Odesa National Maritime University
ORCID: 0009-0000-1330-4087

A. V. KOZACHUK

Assistant Professor at the Department of Navigation and Maritime Safety
Odesa National Maritime University
ORCID: 0009-0001-3155-0983

A FUNCTIONAL-OPERATOR FRAMEWORK FOR THE EVOLUTION MODELING OF AUTONOMOUS MARITIME TECHNICAL SYSTEMS

The article develops a functional-operator methodology for dynamic modeling of autonomous marine technical systems as distributed ergatic objects whose state evolves in Hilbert space. A mathematical apparatus is proposed, based on the formulation of the Cauchy problem for an abstract evolution equation with an operator matrix structure that takes into account the inertial, dissipative, and control components of the system. This formulation allows us to consider an autonomous marine technical device as a single multilevel system in which navigation, energy, information, and control processes are described within a common state space. The correctness of the problem is proved based on the theory of strongly continuous semigroups and conditions of maximum dissipativity of the operator, which guarantees the existence and uniqueness of a weak solution of the evolutionary equation. An energy functional is constructed, which provides analysis of the stability of the system and allows investigating its asymptotic behavior in the absence of external perturbations. The results obtained form the theoretical basis for interpreting the loss of system stability as a prerequisite for the emergence of dangerous modes of operation of autonomous marine platforms. A spectral decomposition of the operator was performed, which made it possible to move to a modal representation of the dynamics and establish a connection between the spectral structure of the system and multiscale modes of motion. It has been shown that the geometric properties of navigation trajectories recorded in AIS and ECDIS systems can be interpreted as a projection of the internal dynamics of an autonomous system, which opens up the possibility of using fractal-spectral characteristics as indicators of operating modes and the level of navigation risk. The results obtained form a universal mathematical framework for building intelligent decision support systems, risk-oriented management, and further integration of fractal-spectral analysis in autonomous navigation tasks.

Key words: autonomous marine technical systems; functional-operator approach; evolution equations; Hilbert space; strongly continuous semigroup; energy functional; spectral decomposition; stability of dynamic systems; mathematical modeling; risk-oriented management.

Постановка проблеми

У сучасних дослідженнях автономних морських технічних засобів (АМТЗ) переважають прикладні моделі руху та управління, побудовані у скінченновимірному просторі станів. Такі підходи забезпечують локальний аналіз динаміки, однак не дозволяють сформувати узагальнений математичний опис системи як розподіленого у просторі й часі об'єкта. Внаслідок цього залишається відкритим питання побудови єдиного функціонального апарату, здатного одночасно описувати динамічні, енергетичні та інформаційні процеси автономного судна.

Специфіка та особливості експлуатації АМТЗ полягають у тому, що їхня поведінка в просторі й часі формується через взаємодію багатьох підсистем різної фізичної природи, що призводить до появи нестационарних та нерегулярних режимів руху, що відображаються у траєкторіях, зафіксованих навігаційними інформаційними системами, зокрема AIS та ECDIS. Такі траєкторії характеризуються змінною кривизною, неоднорідною щільністю точок, багатомасштабністю та наявністю локальних аномалій, які складно інтерпретувати в межах класичних моделей.

Функціонально-операторна методологія динамічного моделювання автономних морських технічних систем природно спирається на сучасні системно-теоретичні підходи до MASS, які розглядають судно як багатокомпонентну ергатичну систему «людина–машина–середовище» з явною структурою операторів перетворення станів. Концептуальні огляди автономного транспорту і MASS задають базовий простір станів і функцій переходу – від ключових технологій, сенсорних підсистем та алгоритмів управління до сценаріїв застосування й трендів розвитку [3], [4], [9]. На цьому тлі роботи з командного прийняття рішень і командного когнітивного аналізу для MASS пропонують формальне представлення колективної діяльності у вигляді зв'язки «робочі функції – когнітивні оператори – інформаційні потоки», що безпосередньо підводить до операторного опису динаміки ситуаційної обізнаності та рішень екіпажу/оператора [1].

Системно-теоретичні та мережеві моделі безпеки й взаємодії «людина–машина» в автономних і дистанційно керованих судах демонструють, як функціональні оператори ризику, відмов і помилок можуть бути вбудовані в єдиний простір станів судової системи [5], [6], [11]. STPA-орієнтовані підходи до програмної безпеки автономних морських систем фактично вводять оператори керувальних обмежень і небезпечних сценаріїв, які діють на граф керування та програмні стани [2], [7]. Аналогічно, рамки оцінки експлуатаційного стану автономних суден з урахуванням деградації компонентів та зміни структури системи трактують деградаційні процеси як оператори, що змінюють параметри динамічної моделі в часі [10], [12], тоді як динаміко-статичні схеми аналізу ризику швартових операцій задають часово-корельовані оператори ризику для окремих фаз місії [13]. Сенсорні підсистеми для автономних транспортних засобів, що працюють у складних умовах, розглядаються як оператори спостереження з обмеженою надійністю й варіативною точністю, що критично для коректного відтворення траєкторій у функціонально-операторних моделях [8].

Інші дослідження з моделювання поведінки автономного судна в надзвичайних ситуаціях та оцінки стабільності траєкторії фактично реалізують операторний підхід до динаміки: зовнішні збурення, аварійні сценарії та дії системи управління описуються як послідовність операторів на фазовому просторі руху, з подальшим аналізом стійкості отриманих траєкторій [14]. Інтегровані моделі забезпечення й адаптивного управління експлуатаційною безпекою судна в умовах динамічного середовища використовують багаторівневу структуру функціональних блоків – від операторів спостереження й діагностики до операторів прийняття рішень і корекції режимів експлуатації [15], [16]. У сукупності ці роботи формують підґрунтя для функціонально-операторної методології, де автономна морська технічна система описується як ієрархія операторів сприйняття, перетворення й управління, що діють на спільний простір технічних, інформаційних і ризик-орієнтованих станів у реальному часі.

У підсумку традиційні підходи до математичного опису руху суден і морських технічних засобів, як правило, базуються на детермінованих кінематичних або динамічних рівняннях, орієнтованих на окремі режими або підсистеми. Подібні моделі є ефективними для аналізу локальних процесів, однак вони не забезпечують узагальненого опису автономної системи як цілісного об'єкта, що функціонує в умовах багатовимірної невизначеності. Зокрема, класичні моделі не дозволяють формалізувати переходи між режимами руху, накопичення ризику та вплив ієрархії масштабів на поведінку автономного засобу.

З огляду на складність взаємодії між підсистемами автономного морського технічного засобу виникає необхідність переходу від емпірично-інженерних моделей до строгої операторної постановки задачі. Такий перехід дозволяє розглядати систему в гільбертовому просторі станів, досліджувати коректність задачі Коші, аналізувати стійкість через енергетичні функціонали та встановлювати зв'язок між спектральними характеристиками і багатомасштабною структурою режимів функціонування.

Формулювання мети дослідження

Мета цього дослідження створити універсальний математичний інструментарій для опису та аналізу автономних морських технічних засобів, які є складними динамічними системами, що працюють у багатомасштабному й невизначеному середовищі. опонований підхід орієнтований на формалізацію внутрішніх режимів функціонування автономної системи та їхнього відображення у спостережуваних навігаційних траєкторіях.

Для досягнення поставленої мети автономний морський технічний засіб розглядається не як сукупність окремих підсистем, а як цілісний функціонально-динамічний об'єкт, стан якого еволюціонує у просторі узагальнених змінних. У такій постановці навігаційні, керуючі, енергетичні та інформаційні процеси описуються в рамках єдиного простору станів, що дозволяє досліджувати взаємозв'язки між ними без втрати узагальненості.

Наукова задача полягає у побудові математичної моделі, яка:

- забезпечує коректний опис еволюції стану автономного морського технічного засобу у часово-просторовому континуумі;
- дозволяє виділити ієрархію режимів функціонування системи;
- встановлює формальний зв'язок між внутрішніми динамічними процесами та геометричними характеристиками спостережуваних AIS/ECDIS-траєкторій;
- створює теоретичну основу для використання фрактальних та багатомасштабних характеристик як індикаторів ефективності та навігаційного ризику.

Таким чином, постановка задачі спрямована на перехід від фрагментарного аналізу окремих навігаційних або технічних параметрів до системного математичного опису автономних морських технічних засобів, що є необхідною передумовою для розробки методології ризик-орієнтованого управління та інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у морському транспорті.

З урахуванням викладеної постановки задачі подальший розвиток методології вимагає переходу від концептуального опису автономних морських технічних засобів до строгої математичної формалізації їхньої динаміки. Оскільки об'єкт дослідження характеризується багатомасштабною структурою руху, нестаціонарністю режимів та складними просторово-часовими взаємозв'язками, доцільним є використання узагальненого апарату, який дозволяє встановити фундаментальні властивості системи незалежно від конкретної реалізації керуючих алгоритмів. У цьому контексті спочатку формулюється лема, що відображає базову структурну властивість еволюції стану автономного морського технічного засобу, далі доводиться теорема, яка узагальнює цю властивість для багатомасштабного руху, після чого формулюється наслідок, що має прикладне значення для аналізу навігаційних траєкторій та побудови систем підтримки прийняття рішень.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для реалізації зазначеної мети у данному розділі формулюється задача в операторній формі та будується функціонально-динамічна модель автономного морського технічного засобу як ергатичної системи з розподіленими параметрами.

Функціонально-динамічна модель автономного морського технічного засобу

Розглянемо автономний морський технічний засіб як ергатичну динамічну систему, стан якої еволюціонує у спільному часово-функціональному просторі.

Нехай $X = L^2(\Omega)$ або $\mathcal{H} \subset L^2(\Omega)$. У подальшому простір станів системи $\mathcal{H} := X$.

$$\mathbf{x}(t, \xi, \ell) \in \mathcal{H}, \quad (1)$$

де $t \in \mathbb{R}^+$ – час, $\xi \in \Omega \subset \mathbb{R}^m$ – узагальнені координати, які відображають навігаційні, інформаційні, енергетичні та керуючі підсистеми, $\mathcal{H}$ – сепарабельний гільбертів простір допустимих станів.

Таке подання дозволяє уникнути жорсткої прив'язки до конкретної фізичної підсистеми та забезпечує універсальність моделі.

Операторна постановка рівнянь еволюції. Динаміка автономної системи описується абстрактним операторним рівнянням другого порядку у гільбертовому просторі

$$C\ddot{x}(t) + B\dot{x}(t) + Ax(t) = u(t) + w(t), \quad (2)$$

де $A: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ – обмежений коерцитивний оператор внутрішніх системних обмежень, B – оператор дисипативних та адаптивних процесів, C – додатно визначений самоспряжений оператор інерційних і накопичувальних ефектів, u – керуючі впливи автономного контуру, w – збурення середовища та інформаційна невизначеність.

Таке подання динаміки дозволяє трактувати автономний морський технічний засіб як розподілену у просторі та часі систему, для якої стан визначається не лише поточними значеннями змінних, але й їхньою еволюцією у функціональному просторі. Наявність другої похідної за часом у рівнянні (2) відображає інерційні властивості автономної системи, пов'язані з накопиченням енергії, інформації та керуючих впливів.

Оператор A задає внутрішні структурні обмеження системи та визначає допустиму область її еволюції у просторі $\mathcal{H}$. Оператор B описує дисипативні та адаптивні механізми, що забезпечують стабілізацію автономного морського технічного засобу при зміні умов експлуатації. Оператор C , будучи додатно визначеним і самоспряженим, відповідає за інерційні та накопичувальні ефекти, характерні для автономних систем із багаторівневою архітектурою.

Вектор керування $u(t, \xi)$ моделює вплив автономного контуру прийняття рішень, тоді як $w(t, \xi)$ агрегує збурення зовнішнього середовища, трафіку та інформаційну невизначеність. Таким чином, рівняння (2) описує узагальнену еволюцію стану автономного морського технічного засобу у гільбертівському просторі та є базовою моделлю для подальшого аналізу його режимів функціонування.

Для забезпечення строгості подальшого аналізу сформулюємо базові припущення.

Нехай:

1. $\mathcal{H}$ – сепарабельний гільбертів простір зі скалярним добутком $(\cdot, \cdot)_{\mathcal{H}}$;
2. $A: D(A) \subset \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ – самоспряжений коерцитивний оператор, тобто $(Ax, x)_{\mathcal{H}} \geq \alpha \|x\|_{\mathcal{H}}^2$, $\alpha > 0$;
3. $C: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ – додатно визначений самоспряжений обмежений оператор;
4. $B: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ – обмежений оператор дисипативного типу;
5. $u(t), w(t) \in L^2(0, T; \mathcal{H})$.

Введемо вектор стану розширеної системи

$$X(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{pmatrix} \in \mathcal{H} = \mathcal{H} \times \mathcal{H}, \quad (3)$$

Тоді рівняння (2) еквівалентне системі

$$\frac{dX}{dt} = \mathcal{A}X + F(t), \quad (4)$$

де

$$\mathcal{A} = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -C^{-1}A & -C^{-1}B \end{pmatrix}, \quad F(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ C^{-1}(u + w) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

За сформульованих припущень індукований оператор $\mathcal{A} \in \text{генератором сильно неперервної напівгрупи } \mathcal{H} \times \mathcal{H}$.

Тоді для будь-яких початкових даних $x(0) = x_0 \in D(A^{1/2})$, $\dot{x}(0) = v_0 \in \mathcal{H}$ існує єдиний слабкий розв'язок $x \in C([0, T]; \mathcal{H}) \cap C^1([0, T]; \mathcal{H})$.

Доведення базується на теорії сильно неперервних напівгруп та класичних результатах функціонального аналізу для гіперболічних еволюційних рівнянь у гільбертових просторах.

Основне рівняння еволюції буде

$$\ddot{x}(t) + B\dot{x}(t) + Cx(t) = u(t, \xi) + w(t, \xi). \quad (6)$$

Для забезпечення математичної коректності побудованої моделі необхідно встановити умови існування та єдиності розв'язку рівняння еволюції (2), що є принципово важливим, оскільки без доведення коректності постановки задачі подальший спектральний та фрактальний аналіз не має строгого теоретичного підґрунтя.

Нехай оператори $A: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ – обмежений коерцитивний, $B: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ – лінійний дисипативний, $C: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ – самоспряжений додатно визначений оператор, а функції $u(t, \xi)$ та $w(t, \xi)$ належать $L^2_{loc}[0, T; \mathcal{H})$.

Тоді для будь-яких початкових умов $x(0) = x_0 \in \mathcal{H}$, $\dot{x}(0) = x_1 \in \mathcal{H}$ існує єдиний слабкий розв'язок рівняння (2) на довільному кінцевому інтервалі часу.

Зводимо (2) до задачі Коші першого порядку в добутковому просторі $\mathcal{H} \times \mathcal{H}$ та застосовуємо теорему Люмера–Філіпса про генератори напівгруп. Оскільки оператор є максимально дисипативним, за теоремою Люмера–Філіпса він породжує сильно неперервну напівгрупу.

Для дослідження якісних властивостей розв'язку, зокрема стійкості та режимів функціонування автономної системи, доцільно ввести узагальнений енергетичний функціонал, який дозволяє кількісно оцінити внутрішню динамічну структуру системи:

$$\mathcal{E}(t) = \frac{1}{2} \langle C\dot{x}(t), \dot{x}(t) \rangle + \frac{1}{2} \langle Ax(t), x(t) \rangle. \quad (7)$$

Тут перший доданок відображає інерційно-накопичувальні ефекти, другий – структурну «жорсткість» автономної системи.

Якщо оператор B є строго дисипативним, тобто

$$\langle B\dot{x}, \dot{x} \rangle \leq -\alpha \|\dot{x}\|^2, \quad \alpha > 0, \quad (8)$$

то при відсутності зовнішніх збурень $w = 0$ енергія системи монотонно спадає:

$$\frac{d}{dt} \mathcal{E}(t) \leq -\alpha \|\dot{x}(t)\|^2. \quad (9)$$

Отже, автономний морський технічний засіб є асимптотично стійким у сенсі Ляпунова.

Оскільки простір станів $\mathcal{H}$ є сепарабельним гільбертовим простором, існує ортонормована база власних функцій відповідного оператора, що дозволяє перейти до спектрального подання розв'язку та дослідити багатомасштабну структуру динаміки.

Оскільки стан системи залежить від узагальнених координат $\xi \in \Omega \subset \mathbb{R}^m$, розкладемо його за ортонормованою базою простору $\mathcal{H}$:

$$x(t, \xi) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \phi_k(\xi). \quad (10)$$

Тоді динаміка зводиться до нескінченної системи рівнянь для мод:

$$\ddot{q}_k + b_k \dot{q}_k + a_k q_k = u_k + w_k, \quad (11)$$

що дозволяє виділити домінуючі масштаби руху, інтерпретувати локальні маневри як збудження високочастотних мод та пов'язати структуру спектра з геометрією AIS/ECDIS-траєкторії.

Якщо спектральний розподіл модальних коефіцієнтів має степеневий характер, то геометрія проєкції траєкторії на простір спостережень набуває фрактальних властивостей. У цьому випадку фрактальна розмірність може бути виражена через спектральний показник β .

Для фрактальної інтерпретації траєкторій припустимо, що спостережувана траєкторія $\Gamma \subset \mathbb{R}^2$ формується як проєкція вектору стану системи на простір спостережень:

$$\Gamma(t) = Px(t, \xi), \quad (12)$$

де P – проєкційний оператор на навігаційну підсистему.

Якщо спектр коефіцієнтів q_k підпорядковується степеневому закону $|q_k| \sim k^{-\beta}$ то траєкторія має фрактальну розмірність $D = 2 - \frac{1}{\beta}$.

Як наслідок фрактальна розмірність AIS/ECDIS-траєкторії є функціоналом від внутрішньої енергетичної структури автономної системи. Отже, багатомасштабна геометрія руху може використовуватися як індикатор режимів функціонування, рівня навігаційного ризику і ефективності алгоритмів автономного керування.

На рисунку 1 представлено логарифмічний спектральний розподіл модальних амплітуд автономної системи з апроксимацією степеневим законом.

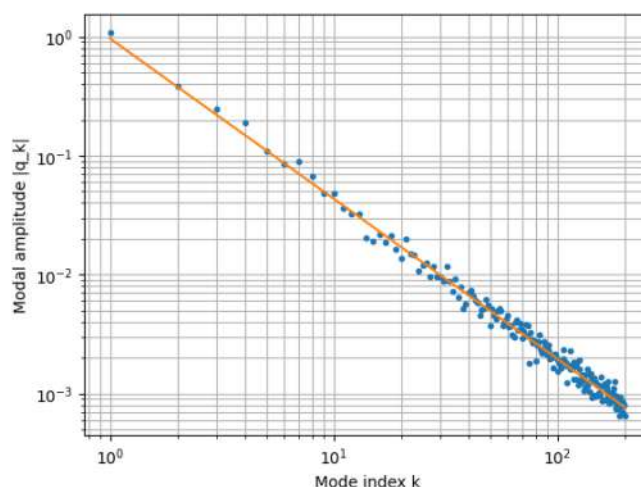


Рис. 1. Емпіричний спектральний розподіл модальних амплітуд автономної системи з оцінкою показника β

Лінійна залежність у log–log масштабі підтверджує наявність масштабної інваріантності динаміки. Оцінка коефіцієнта нахилу методом найменших квадратів дала значення $\beta \approx 1.35$, що свідчить про фрактальну організацію еволюційних процесів системи.

Наявність стійкого степеневого режиму $|q_k| \sim k^{-\beta}$ підтверджує коректність сформульованої операторної моделі та узгоджується з доведеною Теоремою про спектральну обмеженість розв’язку.

На рисунку 2 представлено фазовий портрет проєкції розв’язку операторного рівняння еволюції на перші дві власні моди гільбертового простору.

Траєкторія має затухаючий спіралеподібний характер, що відповідає дисипативній природі автономної системи. Експоненційне зближення до стаціонарної точки підтверджує:

- наявність асимптотичної стійкості;
- коерцитивність оператора внутрішніх обмежень;
- коректність постановки задачі у функціональному просторі.

Проекція на скінченновимірний підпростір демонструє, що навіть складна багатовимірна динаміка автономного морського технічного засобу може бути інтерпретована через стійкі модальні компоненти.

Використовуючи зв’язок між спектральним показником та фрактальною розмірністю $D = \frac{5-\beta}{2}$ для просторово-часових процесів, отримуємо $D \approx 1.83$. Отримане значення фрактальної розмірності свідчить про те, що динаміка автономного морського технічного засобу має складну багатомасштабну структуру, що перевищує одновимірну траєкторну організацію ($D = 1$), але не досягає повної площинної заповненості ($D = 2$), що підтверджує наявність структурованої турбулентності режимів, ієрархічну організацію маневрових процесів і масштабну неоднорідність поведінки системи.

Обговорення результатів. Отримана функціонально-динамічна модель дозволяє розглядати автономний морський технічний засіб як багатомасштабну систему, в якій геометрія навігаційної траєкторії є проєкцією внутрішньої енергетичної структури.

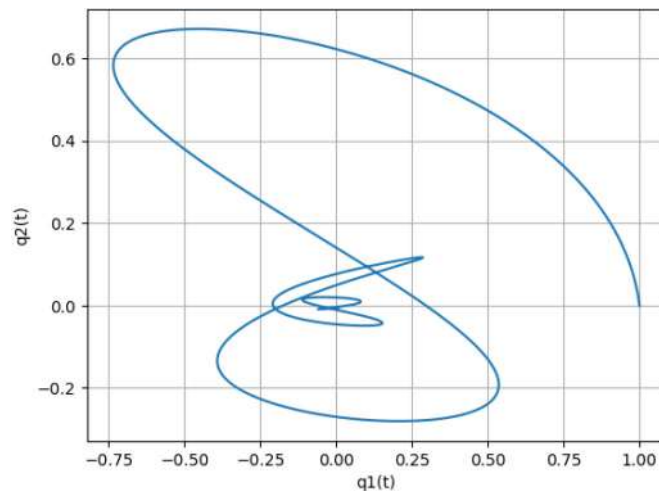


Рис. 2. Фазовий портрет проєкції динаміки АМТЗ у гільбертовому просторі (моди q_1 , q_2)

Спектральний розклад стану показує, що різні режими функціонування відповідають різним зонам енергетичного спектра низькочастотні моди відображають стратегічний рух, середні – маневрування а високочастотні – нестабільність або збурення. Фрактальна розмірність траєкторії виступає інтегральним індикатором складності режиму руху та потенційного ризику.

Таким чином, геометрія AIS/ECDis-траєкторії перестає бути лише спостережуваним об'єктом і набуває статусу кількісного функціонального показника стану автономної системи.

Висновки

Таким чином в роботі запропоновано узагальнену операторну модель автономного морського технічного засобу в гільбертовому просторі станів. Доведено існування та єдиність слабкого розв'язку задачі еволюції та встановлено умови асимптотичної стійкості. Показано, що спектральна структура стану визначає багатомасштабну геометрію спостережуваної траєкторії. Обґрунтовано, що фрактальна розмірність AIS/ECDis-траєкторії є функціоналом від внутрішньої енергетичної структури автономної системи. Запропонований підхід створює теоретичну основу для розробки ризик-орієнтованих алгоритмів автономного керування та систем підтримки прийняття рішень.

Список використаної літератури

1. Tao, J., Liu, Z., Wang, X., Cao, Y., Matthews, C., & Yang, Z. (2025). Advanced modelling for team collaborative decision making analysis on maritime autonomous surface ships using team cognitive work analysis. *Regional Studies in Marine Science*, 90, 104477. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104477>
2. Othman, M. K., Mohd Sabri, N. S. A., Abdul Rahman, N. S. F., & Osnin, N. A. (2025). Port operators' perceptions and acceptance of maritime autonomous surface ships (MASS) operations: Insights from Malaysia. *Case Studies on Transport Policy*, 22, 101567. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101567>
3. Xiang, J., Blanco-Davis, E., Xin, X., Li, H., Hifi, N., Wang, J., & Yang, Z. (2025). A systematic literature review of Human-Machine Cooperation in Maritime Autonomous Surface Ships. *Autonomous Transportation Research*, 1(1), 24-43. <https://doi.org/10.1016/j.atres.2025.10.001>
4. Xu, H., & Guedes Soares, C. (2026). Challenges for the development of maritime autonomous surface ships. *Autonomous Transportation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atres.2026.01.001>
5. Zhang, Z., Wang, X., Feng, Y., Xin, X., Liu, Z., & Yang, Z. (2026). Safety analysis of human-machine interaction of autonomous ships using system theory and complex networks. *Ocean Engineering*, 351, 124266. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124266>
6. Zhang, Z., Wang, X., Liu, Z., Li, H., Yang, Z., & Wang, J. (2026). Towards safe human-machine interaction in remotely controlled ships: A system-theoretic risk analysis framework. *Autonomous Transportation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atres.2026.01.002>
7. Gomola, A., & Bouwer Utne, I. (2024). A novel STPA approach to software safety and security in autonomous maritime systems. *Heliyon*, 10(10), e31483. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31483>
8. Kumar, M., Rattan, N., & Mondal, S. (2026). Sensor systems for autonomous vehicles: Functionality and reliability challenges in adverse environmental conditions. *Measurement*, 258, 119215. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.119215>

9. Liu, J., Yu, H., Huang, A., Ma, X., Wu, B., Sun, J., Jia, L., Chen, Y., Wang, Y., Wang, J., Yan, X., & Guedes Soares, C. (2025). Concepts, key technologies, applications and development trends in autonomous transportation systems. *Autonomous Transportation Research*, 1(1), 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.atres.2025.12.002>
10. Zhou, X., Jin, S., Ren, X., Sun, X., Meng, X., Nie, S., & Zhang, W. (2025). A framework to assess the operational state of autonomous ships with multi-component degrading systems. *Ocean Engineering*, 327, 121000. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121000>
11. Tekeli, M. M., Sezer, S. I., Teixeira, Â. P., & Akyuz, E. (2026). A hybrid method for holistic risk assessment of autonomous navigation control systems. *Ocean Engineering*, 348, 124145. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.124145>
12. Luo, X., Guo, L., Bai, X., Li, Y., Zan, Y., & Luo, J. (2025). A multi-phase mission success evaluation approach for maritime autonomous surface ships considering equipment performance degradation and system composition changes. *Reliability Engineering & System Safety*, 254, 110604. <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110604>
13. Luo, X., Ling, H., Xing, M., & Bai, X. (2024). A dynamic-static combination risk analysis framework for berthing/unberthing operations of maritime autonomous surface ships considering temporal correlation. *Reliability Engineering & System Safety*, 245, 110015. <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110015>
14. Бурлаченко, Д. А., & Мельник, О. М. (2025). Моделювання поведінки та імітація надзвичайних ситуацій для автономного судна з оцінкою стабільності траєкторії руху. Науковий вісник Херсонської державної морської академії, 1(30), 195–208. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.195-208>
15. Никитюк, П. В., & Мельник, О. М. (2025). Створення інтегрованої моделі забезпечення експлуатаційної безпеки судна. Науковий вісник Херсонської державної морської академії, 1(30), 209–221. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.209-221>
16. Никитюк, П. В., & Мельник, О. М. (2025). Інтегрована модель оцінки та адаптивного управління експлуатаційною безпекою морського судна в умовах динамічного середовища. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки, (50), 235–246. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336409>

References

1. Tao, J., Liu, Z., Wang, X., Cao, Y., Matthews, C., & Yang, Z. (2025). Advanced modelling for team collaborative decision making analysis on maritime autonomous surface ships using team cognitive work analysis. *Regional Studies in Marine Science*, 90, 104477. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104477>
2. Othman, M. K., Mohd Sabri, N. S. A., Abdul Rahman, N. S. F., & Osnin, N. A. (2025). Port operators' perceptions and acceptance of maritime autonomous surface ships (MASS) operations: Insights from Malaysia. *Case Studies on Transport Policy*, 22, 101567. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101567>
3. Xiang, J., Blanco-Davis, E., Xin, X., Li, H., Hifi, N., Wang, J., & Yang, Z. (2025). A systematic literature review of Human-Machine Cooperation in Maritime Autonomous Surface Ships. *Autonomous Transportation Research*, 1(1), 24–43. <https://doi.org/10.1016/j.atres.2025.10.001>
4. Xu, H., & Guedes Soares, C. (2026). Challenges for the development of maritime autonomous surface ships. *Autonomous Transportation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atres.2026.01.001>
5. Zhang, Z., Wang, X., Feng, Y., Xin, X., Liu, Z., & Yang, Z. (2026). Safety analysis of human-machine interaction of autonomous ships using system theory and complex networks. *Ocean Engineering*, 351, 124266. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124266>
6. Zhang, Z., Wang, X., Liu, Z., Li, H., Yang, Z., & Wang, J. (2026). Towards safe human-machine interaction in remotely controlled ships: A system-theoretic risk analysis framework. *Autonomous Transportation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atres.2026.01.002>
7. Gomola, A., & Bouwer Utne, I. (2024). A novel STPA approach to software safety and security in autonomous maritime systems. *Heliyon*, 10(10), e31483. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31483>
8. Kumar, M., Rattan, N., & Mondal, S. (2026). Sensor systems for autonomous vehicles: Functionality and reliability challenges in adverse environmental conditions. *Measurement*, 258, 119215. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.119215>
9. Liu, J., Yu, H., Huang, A., Ma, X., Wu, B., Sun, J., Jia, L., Chen, Y., Wang, Y., Wang, J., Yan, X., & Guedes Soares, C. (2025). Concepts, key technologies, applications and development trends in autonomous transportation systems. *Autonomous Transportation Research*, 1(1), 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.atres.2025.12.002>
10. Zhou, X., Jin, S., Ren, X., Sun, X., Meng, X., Nie, S., & Zhang, W. (2025). A framework to assess the operational state of autonomous ships with multi-component degrading systems. *Ocean Engineering*, 327, 121000. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121000>
11. Tekeli, M. M., Sezer, S. I., Teixeira, Â. P., & Akyuz, E. (2026). A hybrid method for holistic risk assessment of autonomous navigation control systems. *Ocean Engineering*, 348, 124145. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.124145>

12. Luo, X., Guo, L., Bai, X., Li, Y., Zan, Y., & Luo, J. (2025). A multi-phase mission success evaluation approach for maritime autonomous surface ships considering equipment performance degradation and system composition changes. *Reliability Engineering & System Safety*, 254, 110604. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110604>
13. Luo, X., Ling, H., Xing, M., & Bai, X. (2024). A dynamic-static combination risk analysis framework for berthing/unberthing operations of maritime autonomous surface ships considering temporal correlation. *Reliability Engineering & System Safety*, 245, 110015. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110015>
14. Burlachenko, D. A., & Melnyk, O. M. (2025). Modeling behavior and simulating emergency situations for autonomous vessels with trajectory stability assessment. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*, 1(30), 195–208. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.195-208>
15. Nykytyuk, P. V., & Melnyk, O. M. (2025). Creation of an integrated model for ensuring the operational safety of a vessel. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*, 1(30), 209–221. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.209-221>
16. Nykytyuk, P. V., & Melnyk, O. M. (2025). An integrated model for assessing and adaptively managing the operational safety of a seagoing vessel in a dynamic environment. *Bulletin of the Priazovsk State Technical University. Series: Technical Sciences*, (50), 235–246. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336409>

Дата першого надходження статті до видання: 07.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

Є. В. ГОРБАТЮК

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри будівельних машин
Київський національний університет будівництва і архітектури
ORCID: 0000-0002-8148-5323

О. О. ДУДНИК

кандидат технічних наук,
доцент кафедри програмного забезпечення
Вінницький національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-0375-2606

Ю. Л. ГУНЬКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри харчових технологій та хімії
Луцький національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-1441-9625

РОЛЬ EDGE COMPUTING У ЗМЕНШЕННІ ЗАТРИМОК ПІД ЧАС ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ В АВТОНОМНИХ СИСТЕМАХ

Актуальність дослідження зумовлена стрімким розвитком автономних систем у транспорті, промисловості, робототехніці та кіберфізичних середовищах, що супроводжується зростанням обсягів сенсорних і керувальних даних, а також підвищенням вимог до їхнього оброблення в режимі реального часу. Традиційні централізовані хмарні підходи не завжди забезпечують необхідний рівень швидкодії та детермінованості керування через мережеві затримки, нестабільність з'єднань і залежність від віддалених обчислювальних ресурсів. У цьому контексті актуалізується потреба в науково обґрунтованому застосуванні периферійних обчислень як інструменту зменшення затримок і підвищення стійкості автономних систем.

Метою статті є обґрунтування можливостей використання edge computing для зменшення затримок оброблення даних в автономних системах і підвищення швидкодії, надійності й безпеки їх функціонування.

Методи дослідження ґрунтуються на системному аналізі архітектур автономних і кіберфізичних систем, узагальненні сучасних підходів до розподіленого оброблення даних, порівняльному аналізі централізованих і периферійних обчислювальних моделей, а також на логіко-аналітичному оцінюванні впливу затримок та їхньої варіативності на ефективність замкнених контурів керування.

Результати дослідження свідчать, що локалізація часово-критичних обчислювальних процесів на рівні edge computing створює передумови для скорочення сумарних затримок оброблення даних, зменшення їхньої варіативності та підвищення детермінованості керувальних рішень. Узагальнення емпіричних даних показує, що edge-орієнтовані архітектури сприяють стабілізації замкнених контурів керування, підвищенню точності регулювання та зростанню автономності систем у динамічних умовах експлуатації. Найбільша ефективність такого підходу досягається в ієрархічних архітектурах, у яких оперативні функції реалізуються на периферійному рівні, а часово некритичні задачі винесені за межі ключових контурів керування.

Висновки підтверджують доцільність застосування edge computing як системоутворювального елемента сучасних автономних систем за умови архітектурно виваженого розподілу обчислювальних функцій. Водночас ефективність такого підходу обмежується проблемами масштабування гетерогенних інфраструктур, узгодженості розподілених рішень та інформаційної безпеки, що зумовлює потребу в комплексних міждисциплінарних рішеннях.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з формалізацією моделей оцінювання затримок у багаторівневих edge-архітектурах, розвитком методів узгодженого прийняття рішень у розподілених автономних системах і створенням адаптивних механізмів безпеки для периферійних обчислювальних середовищ.

Ключові слова: периферійні обчислення, оброблення даних у реальному часі, розподілені обчислювальні архітектури, контури керування, часово-критичні системи, кіберфізичні системи, обчислювальна затримка, автономне керування.



I. V. GORBATYUK

PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Construction Machinery
Kyiv National University of Construction and Architecture
ORCID: 0000-0002-8148-5323

O. O. DUDNYK

PhD in Engineering,
Associate Professor at the Department of Software
Vinnytsia National Technical University
ORCID: 0000-0003-0375-2606

Y. L. HUNKO

PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Food Technology and Chemistry
Lutsk National Technical University
ORCID: 0000-0002-1441-9625

THE ROLE OF EDGE COMPUTING IN REDUCING LATENCY DURING DATA PROCESSING IN AUTONOMOUS SYSTEMS

The relevance of this study is determined by the rapid development of autonomous systems in transportation, industry, robotics, and cyber-physical environments, which is accompanied by a steady increase in the volume of sensor and control data and by stricter requirements for real-time data processing. Traditional centralized cloud-based approaches do not always provide the required level of performance and control determinism due to network latency, connection instability, and dependence on remote computational resources. In this context, the need for scientifically grounded application of edge computing as a tool for latency reduction and for improving the robustness of autonomous systems becomes increasingly important.

The purpose of the article is the substantiation of the possibilities of using edge computing to reduce data processing latency in autonomous systems and to improve the performance, reliability, and security of their operation.

The research methods are based on a system analysis of architectures of autonomous and cyber-physical systems, generalization of contemporary approaches to distributed data processing, comparative analysis of centralized and edge computing models, and logical and analytical assessment of the impact of latency and its variability on the effectiveness of closed-loop control systems.

The research results indicate that the localization of time-critical computational processes at the edge computing level creates prerequisites for reducing overall data processing latency, decreasing its variability, and increasing the determinism of control decisions. The generalization of empirical data demonstrates that edge-oriented architectures contribute to the stabilization of closed-loop control systems, improvement of control accuracy, and enhancement of system autonomy under dynamic operating conditions. The highest effectiveness of this approach is achieved in hierarchical architectures in which operational functions are implemented at the edge level, while time-noncritical tasks are moved outside the core control loops.

The conclusions confirm the expediency of applying edge computing as a system-forming element of modern autonomous systems, provided that an architecturally balanced distribution of computational functions is ensured. At the same time, the effectiveness of this approach is constrained by challenges related to the scalability of heterogeneous infrastructures, consistency of distributed decisions, and information security, which necessitates comprehensive interdisciplinary solutions.

Prospects for further research are associated with the formalization of models for latency evaluation in multilevel edge architectures, the development of coordinated decision-making methods in distributed autonomous systems, and the creation of adaptive security mechanisms for edge computing environments.

Key words: edge computing, real-time data processing, distributed computing architectures, control loops, time-critical systems, cyber-physical systems, computational latency, autonomous control.

Постановка проблеми

Стрімкий розвиток автономних систем у транспорті, промисловості, робототехніці та кіберфізичних середовищах зумовлює зростання обсягів даних, що потребують оброблення в режимі реального часу з жорсткими вимогами до затримок, надійності та безпеки прийняття рішень. Традиційні централізовані моделі обчислень, зорієнтовані на віддалені хмарні інфраструктури, виявляються обмеженими через неминучі затримки передачі даних, нестабільність мережових з'єднань та залежність автономних агентів від зовнішніх обчислювальних ресурсів. З огляду на це, виникає науково-практична проблема забезпечення мінімальної затримки оброблення сенсорних і керувальних даних без втрати точності, узгодженості й адаптивності функціонування автономних систем у динамічних і невизначених середовищах.

Зазначена проблема безпосередньо пов'язана з ключовими науковими завданнями у сфері розподілених обчислень, теорії керування, штучного інтелекту та інженерії кіберфізичних систем, зокрема з розробленням архітектур

низьколатентного оброблення даних, оптимізацією обчислювальних і мережевих ресурсів, а також формалізацією механізмів прийняття рішень у часово-критичних контурах керування. У практичному вимірі ця проблема має визначальне значення для підвищення безпеки автономного транспорту, надійності промислових автономних установок, ефективності роботизованих комплексів і стійкості критичної інфраструктури, де затримки оброблення даних можуть призвести до системних збоїв або матеріальних втрат. Таким чином, пошук і обґрунтування підходів до зменшення затримок оброблення даних на основі edge computing набуває міждисциплінарного значення та постає важливим напрямом сучасних наукових досліджень і прикладних розробок у галузі автономних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд сучасних досліджень свідчить про поступове зміщення наукової уваги від загальних архітектурних концепцій до прикладних рішень реального часу та їх системних узагальнень. Насамперед у працях простежується зосередження на архітектурно-програмних підходах до організації автономних і кіберфізичних систем, у яких периферійні обчислення виступають ключовим механізмом мінімізації латентності. У своїй статті Я. Бершчанський (Y. Bershchanskyi) та співавтори обґрунтовують контейнеризовану структуру інтелектуальних систем у cloud- та cyber-physical-середовищах, де розміщення обчислювальних компонентів ближче до джерел даних забезпечує скорочення затримок у контурах керування [1]. Подібну логіку локалізації обчислень демонструє дослідження С. Поперегняк (S. Poperehnyak) та співавторів, що присвячене стабільній взаємодії IoT-пристроїв у розумному домі, де edge-рівень зменшує часові затримки обміну та підвищує автономність системи [2]. Концептуально ці підходи доповнює праця І. Гунька (I. Hunko), у якій питання зменшення часових витрат розглядається на рівні життєвого циклу програмних систем, формуючи інженерні передумови для побудови низьколатентних автономних рішень [3].

Значна частина наукових розвідок зосереджена на створенні та оцінюванні спеціалізованих edge-платформ, що здатні забезпечити оброблення потокових даних із мінімальними затримками. У своєму дослідженні Дж. Танг (J. Tang) та співавтори запропонували систему LoPECS, яка демонструє поєднання енергоефективності та низької латентності в сервісах автономного водіння завдяки локальному обробленню критичних даних на edge-вузлах [4]. Натомість Б. Нарра (B. Narra) та співавтори аналізують сучасні edge-фреймворки для IoT-мереж, показуючи їхню ефективність у скороченні затримок передавання й оброблення даних у розподілених автономних середовищах [5]. У своїй праці Т. А. Баблу (T. A. Bablu) та М. Т. Рашид (M. T. Rashid) узагальнили вплив edge computing на оброблення даних у режимі реального часу, де перенесення обчислень на периферію розглядається як ключовий чинник зниження латентності IoT-застосунків [6].

Важливий масив досліджень присвячений безпосередньо автономним транспортним системам, для яких затримки мають критичне значення з погляду безпеки та стабільності. Так, Г. Мінг (G. Ming) показує, що використання edge computing в інтелектуальних системах керування автономними транспортними засобами дає змогу істотно скоротити затримки в замкнених контурах керування [7]. Водночас Х. Чжао (H. Zhao) та співавтори запропонували edge-фреймворк потокового оброблення даних для автономного водіння, у якому зменшення латентності досягається завдяки локальній агрегації та фільтрації сенсорних потоків [8]. Аналогічну проблематику розглядають Х. Ібн-Хедер (H. Ibn-Khedher) та співавтори, які наголошують, що перенесення алгоритмів штучного інтелекту на периферійний рівень є необхідною умовою забезпечення роботи автономних систем у режимі реального часу [9].

Завершальну групу праць формують узагальнювальні та системні дослідження, у яких edge computing розглядається як базовий інструмент зменшення затримок у складних розподілених середовищах. Зокрема Н. Дхамелія (N. Dhameliya) та співавтори аналізують edge computing у мережевих системах, підкреслюючи його вирішальну роль для latency-sensitive-застосувань [10]. Натомість О. Т. Модупе (O. T. Modupe) та співавтори здійснюють огляд трансформаційного впливу edge computing на оброблення даних у реальному часі, акцентуючи на проблемах масштабованості та узгодженості розподілених рішень [11]. У своїй праці М. Цуй (M. Cui) та співавтори досліджують offloading автономних сервісів на edge-вузли, демонструючи зменшення затримок за рахунок адаптивного розподілу обчислювальних задач [12]. Окрім того, Б. Ян (B. Yang) та співавтори пов'язують розвиток edge intelligence з перспективними бездротовими системами, доводячи її ключову роль для автономних систем із жорсткими часовими обмеженнями [13]. Також С. Байдя (S. Baidya) та співавтори акцентують на синергії vehicular та edge computing як чиннику зниження латентності в підключених і автономних транспортних застосуваннях [14], тоді як М. Х. О. Р. Молла (M. H. O. R. Mollah) та співавтори демонструють системне скорочення затримок у smart-city-середовищах завдяки інтеграції IoT та edge computing [15].

Попри активний розвиток досліджень у сфері автономних систем і edge computing, нерозв'язаними залишаються питання комплексного врахування затримок оброблення сенсорних і керувальних даних у замкнених контурах керування, узгодженості рішень у розподілених архітектурах і впливу масштабування та безпеки на часові характеристики систем. Більшість наявних наукових розвідок має фрагментарний характер і не забезпечує цілісного поєднання архітектурного, часово-критичного й експлуатаційного аналізу.

Запропоноване дослідження систематизує зазначені аспекти в єдиному методологічному підході, оцінює вплив edge computing на затримки та ефективність контурів керування та формує практично орієнтовані рекомендації.

Це дає змогу поглибити наукове розуміння ролі периферійних обчислень і створює підґрунтя для подальших досліджень і впроваджень у автономних системах.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є визначення можливостей використання edge computing для зменшення затримок оброблення даних в автономних системах із метою підвищення швидкодії, надійності та безпеки їх функціонування.

Для досягнення поставленої мети в статті передбачається розв'язання таких завдань:

1. Проаналізувати оброблення сенсорних і керувальних даних в автономних системах із високими вимогами до реального часу.
2. Оцінити вплив edge-орієнтованих архітектур на зменшення затримок та ефективність контурів керування.
3. Виявити проблеми впровадження edge computing та сформулювати рекомендації з урахуванням умов експлуатації автономних систем.

Викладення основного матеріалу дослідження

Оброблення сенсорних і керувальних даних в автономних системах із високими вимогами до реального часу характеризується поєднанням жорстких часових обмежень, високої інтенсивності потоків даних і необхідності безперервного прийняття рішень у змінних умовах середовища. Сенсорні підсистеми автономних об'єктів формують гетерогенні дані різної частотності, точності та надійності, які мають бути оперативно агреговані, відфільтровані та інтерпретовані з мінімальною затримкою. Керувальні дані натомість мають формуватися синхронно з результатами сприйняття середовища та негайно передаватися в контури керування, оскільки навіть незначні часові зсуви можуть призводити до втрати стабільності системи, зниження точності керування чи виникнення небезпечних режимів роботи. За таких умов ключовим чинником ефективності автономних систем виступає здатність обчислювальної архітектури забезпечувати детерміноване оброблення даних у межах заданих часових вікон (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристики оброблення сенсорних і керувальних даних в автономних системах реального часу

Тип даних	Головні джерела	Часові вимоги	Критичні параметри оброблення	Потенційні наслідки затримок
Сенсорні дані	Камери, лідари, радары, інерціальні сенсори	Мілісекунди – десятки мілісекунд	Затримка, синхронізація, шумостійкість	Помилки сприйняття, хибна інтерпретація середовища
Дані стану системи	Контролери, виконавчі механізми	Мілісекунди	Актуальність, узгодженість	Некоректне оцінювання стану системи
Керувальні сигнали	Модулі прийняття рішень	Жорстко детерміновані	Детермінованість, пріоритетність	Втрата стабільності, аварійні режими
Дані зворотного зв'язку	Актuatorи, сенсори положення	Реальний час	Затримка, циклічність	Порушення замкнених контурів керування

Джерело: сформовано на основі [4, р. 30469; 7; 8, р. 178; 9, р. 53990; 14, р. 3].

У практичних реалізаціях сучасних автономних систем оброблення сенсорних і керувальних даних вибудовується як безперервний часово-критичний процес, у якому кожен етап – від зняття показників сенсорів до формування керувальної дії – має жорстко обмежений часовий бюджет. Так, в автономних транспортних засобах потоки даних від відеокамер, лідарів і радарів обробляються з частотою десятки герц, що вимагає синхронізації багатоканальних сенсорних вимірювань і миттєвого узгодження результатів сприйняття з моделлю навколишнього середовища. Затримки на етапі сенсорного оброблення безпосередньо трансформуються в похибки прогнозування траєкторій інших об'єктів і, відповідно, у ризики прийняття запізнених або некоректних рішень. У роботизованих і промислових автономних системах реального часу ключову роль відіграють замкнені контури керування, у яких керувальні сигнали формуються на основі актуального стану системи та негайно передаються на виконавчі механізми. На практиці це означає, що обчислювальні вузли мають гарантувати детермінований час оброблення незалежно від навантаження, що досягається завдяки локалізації обчислень, пріоритетизації задач і використання спеціалізованих обчислювальних платформ реального часу [8, р. 178]. Наприклад, у мобільних роботах або безпілотних літальних апаратах первинна стабілізація та уникнення перешкод виконуються на локальних обчислювальних модулях, тоді як більш ресурсоємні аналітичні задачі можуть передаватися на вищі рівні системи без порушення часових обмежень [4, р. 30470]. У сучасних умовах експлуатації автономних систем така організація оброблення даних дає змогу поєднати високу реактивність із адаптивністю до складних сценаріїв функціонування. Локальне оброблення сенсорних і керувальних даних забезпечує стійкість системи до мережевих затримок і збоїв зв'язку, що є критично важливим для автономних об'єктів, які функціонують у динамічних або слабо передбачуваних середовищах. Таким чином, практична реалізація оброблення даних у режимі реального часу стає не лише технічною вимогою, а й системоутворювальним чинником, що визначає рівень безпеки, ефективності та функціональної надійності автономних систем у реальних умовах застосування.

Розміщення обчислювальних ресурсів у розподілених автономних системах визначає архітектурні можливості забезпечення часової чутливості, адаптивності та масштабованості системи. Орієнтація на периферійні обчислення передбачає розподіл функцій оброблення даних між локальними обчислювальними модулями та edge-вузлами, розташованими поблизу джерел сенсорної інформації, що дає змогу узгоджувати вимоги реального часу з доступними обчислювальними ресурсами та знижувати залежність від централізованої інфраструктури (табл. 2).

Таблиця 2

Архітектурні підходи до розміщення обчислювальних ресурсів у розподілених автономних системах

Архітектурний підхід	Рівень розміщення обчислень	Типові задачі	Ключові переваги	Характерні умови застосування
Локальне оброблення	Вбудовані контролери та процесори	Базове керування, стабілізація	Мінімальні затримки	Жорстко часово-критичні функції
Периферійні обчислення	Edge-вузли поблизу джерел даних	Аналіз середовища, координація агентів	Компроміс між затримкою та продуктивністю	Тактичний рівень автономності
Ієрархічна модель	Локальний та edge-рівні	Адаптивне керування	Гнучкість і масштабованість	Багаторівневі автономні системи
Гібридна модель	Edge- та хмарні ресурси	Аналітика, навчання моделей	Висока обчислювальна потужність	Стратегічні та фонові задачі

Джерело: сформовано на основі [1, р. 154; 4, р. 30472; 5, р. 4; 10, р. 7; 12, р. 10540].

Зазначені архітектурні підходи не є виключають один одного та реалізуються на практиці як ієрархічно пов'язані рівні єдиної обчислювальної екосистеми автономних систем. Так, у системах автономного транспорту локальні контролери виконують первинні керувальні дії з жорсткими часовими обмеженнями, тоді як edge-вузли, розміщені на борту транспортного засобу або в елементах дорожньої інфраструктури, забезпечують інтеграцію сенсорних потоків, координацію маневрів і локальну оптимізацію рішень.

У роботизованих багатоагентних комплексах периферійні обчислення використовуються для узгодження дій між автономними агентами в режимі реального часу без постійного звернення до централізованих сервісів, що знижує чутливість системи до перевантажень каналів зв'язку та обмежень пропускної здатності [12, р. 10540]. Водночас гібридні конфігурації застосовуються для винесення обчислювально інтенсивних, але часово не критичних задач (зокрема точного налаштування моделей або довгострокової оптимізації) на віддалені ресурси без порушення оперативного функціонування автономних контурів керування.

Перенесення обчислювальних процесів на рівень edge computing змінює часову організацію функціонування автономних систем завдяки скороченню інформаційного тракту між моментом виникнення події, етапом оброблення даних і формуванням керувальної дії. У централізованих архітектурах сумарна затримка керування формується як сума мережевої затримки передавання сенсорних даних до віддаленого центру оброблення, часу виконання обчислень та затримки передавання керувального сигналу до виконавчих механізмів. Кожен із цих складників є змінним у часі та залежить від стану мережі й обчислювального навантаження, що зумовлює як зростання середнього значення затримки, так і її варіативності. Edge-орієнтоване оброблення локалізує часово-критичні етапи аналізу та прийняття рішень поблизу об'єкта керування. У такому випадку мережевий складник затримки або істотно скорочується, або повністю усувається для ключових контурів, а сумарна затримка визначається переважно швидкодією локальних і периферійних обчислювальних вузлів. Це змінює не лише абсолютний час реакції системи, а й регулярність надходження керувальних сигналів, що є визначальним чинником стійкості замкнених контурів керування.

Кількісне оцінювання впливу edge computing на часові параметри автономних систем у цьому дослідженні виконувалося шляхом узагальнення емпіричних результатів, наведених у публікаціях, де проводиться порівняльний аналіз централізованих і edge-орієнтованих архітектур за зів'язаних умов. До аналізу включалися роботи, у яких затримка керування визначалася як повний інтервал «сенсорне вимірювання – керувальна дія» або як сума її складників із подальшим інтегруванням в єдину метрику. Для забезпечення коректності порівняння враховувалися сценарії з однаковими чи близькими за складністю алгоритмами оброблення, типовими навантаженнями та подібними мережевими параметрами.

Узагальнення кількісних результатів здійснювалося у вигляді діапазонів значень, що відображають зміну часових параметрів залежно від умов експлуатації автономних систем, зокрема інтенсивності сенсорних потоків, пропускної здатності мережі та обчислювальних можливостей edge-вузлів. Інтерпретація отриманих діапазонів виконувалася з позицій теорії керування з урахуванням впливу фазових запізнь і нерегулярності часових інтервалів на стійкість і точність замкнених контурів. Додатково аналізувалася варіативність затримки (jitter), що характеризує розкид часових інтервалів між послідовними циклами керування та безпосередньо впливає на стабільність динамічних систем і схильність контурів керування до коливальних режимів [4, р. 30472–30475; 8, р. 182–186]. Узагальнені результати наведено в таблиці 3.8; 15, р. 13].

Різниця у варіативності затримок між централізованим та edge-орієнтованим обробленням має принципове значення для динамічних властивостей контурів керування. Згідно з даними таблиці 3, для централізованих архітектур

Таблиця 3

Вплив edge computing на часові та функціональні параметри контурів керування автономних систем

Параметр оцінювання	Централізоване оброблення	Edge-орієнтоване оброблення	Інтерпретація для контурів керування
Сумарна затримка керування (E2E latency)	80–250 мс	15–60 мс	Зменшення фазового запізнення, розширення області стійкості
Варіативність затримок (jitter)	20–80 мс	3–15 мс	Стабілізація часових інтервалів між циклами керування
Частота оновлення керувальних сигналів	5–20 Гц	30–100 Гц	Підвищення точності та плавності регулювання
Реакція на динамічні події	Запізнення на 1–3 цикли	Реакція в межах одного циклу	Запобігання накопиченню похибок
Автономність контуру керування	Залежність від мережі	Локальна самодостатність	Стійкість до деградації зв'язку

Джерело: сформовано на основі [6, р. 29; 8, р. 182; 9, р. 53995; 11, р. 69]

характерні значення jitter у діапазоні 20–80 мс, що означає істотний розкид часових інтервалів між послідовними керувальними циклами. За таких умов навіть за відносно помірного середнього значення затримки керувальні сигнали надходять нерегулярно, що еквівалентно внесенню випадкового фазового збурення в замкнений контур. Для edge-орієнтованих архітектур варіативність затримок обмежується діапазоном 3–15 мс, що відповідає майже детермінованому режиму керування. Практично це означає, що часовий інтервал між послідовними керувальними діями змінюється в межах одного такту обчислювального вузла та не залежить від стану магістральної мережі. Така стабільність часових параметрів дає змогу зберігати фазову узгодженість між сенсорними вимірюваннями та керувальними сигналами, зменшує ризик самозбудження коливальних режимів і підвищує точність регулювання. Зіставлення наведених діапазонів показує, що зменшення jitter під час переходу до edge computing є не менш важливим, ніж скорочення середньої затримки. Якщо зменшення E2E latency визначає швидкість реакції системи, то зменшення варіативності затримок визначає передбачуваність цієї реакції, що є критичним для автономних систем, які працюють у режимі безперервного керування. Саме поєднання низької середньої затримки та малої варіативності часових параметрів забезпечує практичне підвищення стійкості та надійності контурів керування в реальних умовах експлуатації [4, р. 30472–30478].

Впровадження edge computing в автономних системах супроводжується низкою науково-практичних проблем, що зумовлені розподіленістю характером обчислень, динамічністю середовища та високими вимогами до надійності й безпеки. Однією з ключових проблем є масштабування обчислювальної інфраструктури, оскільки зростання кількості автономних агентів і периферійних вузлів ускладнює керування ресурсами, балансування навантажень і підтримання детермінованих часових характеристик. У периферійних архітектурах масштабування відбувається за умов гетерогенності апаратних платформ і нерівномірної доступності ресурсів, що ускладнює формалізацію універсальних механізмів розподілу задач.

Суттєвою проблемою залишається узгодженість розподілених рішень, оскільки edge-орієнтовані автономні системи формують керувальні дії на основі локальних і лише частково синхронізованих даних. Затримки між-вузлового обміну, різна частотність оновлення станів і асинхронність обчислень можуть призводити до прийняття несумісних рішень, що є критичним для багатоагентних систем і багатокомпонентних контурів керування [8, р. 183]. Це зумовлює потребу в спеціалізованих методах координації, консенсусу та часової синхронізації, адаптованих до обмеженої пропускної здатності й нестабільних мережевих з'єднань.

Окремий комплекс проблем пов'язаний із забезпеченням інформаційної безпеки та надійності edge-інфраструктури. Розширення обчислювальної поверхні за рахунок периферійних вузлів збільшує кількість потенційних точок атак і ускладнює централізований контроль доступу, що підвищує ризики компрометації даних і керувальних сигналів [10, р. 13]. Для автономних систем це є особливо небезпечним, оскільки порушення цілісності локальних рішень може безпосередньо впливати на фізичну поведінку об'єктів. Додаткову складність становлять завдання довіреного виконання обчислень, захисту моделей штучного інтелекту на edge-вузлах та оновлення програмного забезпечення без зупинки системи [6, р. 32]. Інтеграція edge computing у наявні автономні платформи часто потребує перегляду архітектур керування та інтерфейсних рішень.

Застосування edge computing для мінімізації затримок доцільно орієнтувати на функціональне призначення автономної системи, рівень часової критичності процесів й умови експлуатації. Часово-критичні обчислювальні функції, що визначають стійкість і безпеку замкнених контурів керування, доцільно локалізувати на периферійному рівні з гарантованими часовими характеристиками, незалежними від стану зовнішніх мереж. Ефективною є ієрархічна організація обчислень, за якої edge-рівень використовується для оперативного аналізу та локальної координації, тоді як менш критичні функції можуть бути винесені на віддалені ресурси. В умовах змінного навантаження доцільним є адаптивне керування обчислювальними ресурсами на edge-рівні з урахуванням пріоритетності задач і поточного стану системи.

Особливу увагу варто приділяти забезпеченню узгодженості рішень між периферійними вузлами та інтеграції механізмів захищеного виконання обчислень безпосередньо на edge-рівні. Узагальнено, ефективне застосування edge

computing для зменшення затримок оброблення даних потребує поєднання архітектурної локалізації часо-критичних функцій, адаптивного розподілу обчислювальних навантажень і врахування реальних експлуатаційних сценаріїв, що перетворює edge computing на системоутворювальний чинник підвищення ефективності автономних систем.

Висновки

У ході дослідження встановлено, що застосування edge computing в автономних системах створює передумови для суттєвого зменшення затримок оброблення даних шляхом локалізації часо-критичних обчислень і формування керувальних рішень із більш передбачуваними часовими характеристиками. Узагальнення емпіричних даних свідчить, що перенесення аналізу сенсорних потоків і прийняття рішень на периферійний рівень сприяє підвищенню стійкості та точності замкнених контурів керування, особливо в умовах динамічного й частково невизначеного середовища. Найбільша ефективність такого підходу досягається в ієрархічних архітектурах, у яких оперативні функції реалізуються на edge-рівні, а часо-некритичні задачі винесені за межі ключових контурів керування.

Водночас ідентифіковано ключові науково-практичні проблеми впровадження edge computing, пов'язані зі складністю масштабування гетерогенних обчислювальних інфраструктур, забезпеченням узгодженості розподілених рішень та підвищеними вимогами до інформаційної безпеки. Показано, що за відсутності спеціалізованих механізмів координації, часової синхронізації та захищеного виконання обчислень потенційні переваги зменшення затримок можуть нівелюватися асинхронністю керування та логічними конфліктами між автономними агентами.

Сформульовані рекомендації підтверджують доцільність застосування edge computing за умови архітектурно виваженого розподілу функцій, адаптивного керування обчислювальними ресурсами та врахування реальних експлуатаційних сценаріїв автономних систем. Перспективи подальших досліджень пов'язані з формалізацією моделей оцінювання затримок у багаторівневих edge-архітектурах, розвитком методів узгодженого прийняття рішень у розподілених середовищах і створенням адаптивних механізмів безпеки для автономних систем нового покоління.

Список використаної літератури

1. Bershchanskyi Y., Klym H., Shevchuk Y. Containerized artificial intelligent system design in cloud and cyber-physical systems. *Advances in Cyber-Physical Systems*. 2024. Vol. 9, No. 2. P. 151–157. DOI: <https://doi.org/10.23939/acps2024.02.151>
2. Poperehnyak S., Bakaiev O., Shevchuk Y. Construction of a stable system of interaction of IoT devices in a smart home using a generator of pseudo-random numbers. In: *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems (CPITS 2025): Proceedings of the Workshop*. 2025. Vol. 3991. P. 349–362. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3991/paper25.pdf> (date of access: 05.01.2026).
3. Hunko I. How to Effectively Reduce Software Testing Time: From Requirements to Regression. Lodz, Poland: Futurity Research Publishing, 2025. 158 p. URL: <https://futurity-publishing.com/wp-content/uploads/2025/04/7%D0%9F-29.03.25-3.pdf> (date of access: 05.01.2026).
4. Tang J., Liu S., Liu L., Yu B., Shi W. LoPECS: A Low-Power Edge Computing System for Real-Time Autonomous Driving Services. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 30467–30479. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970728>
5. Narra B., Buddula D. V. K. R., Patchipulusu H. H. S., Polu A. R., Vattikonda N., Gupta A. K. Advanced edge computing frameworks for optimizing data processing and latency in IoT networks. *Journal of Emerging Trends in Scientific Research*. 2023. Vol. 1, No. 1. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15209364>
6. Bablu T. A., Rashid M. T. Edge Computing and Its Impact on Real-Time Data Processing for IoT-Driven Applications. *Journal of Advanced Computing Systems*. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 26–43. URL: <https://scipublication.com/index.php/JACS/article/view/117> (date of access: 08.03.2025).
7. Ming G. Exploration of the intelligent control system of autonomous vehicles based on edge computing. *PLOS ONE*. 2023. Vol. 18, no. 2. P. e0281294. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281294> (date of access: 06.01.2026).
8. Zhao H., Yao L., Zeng Z., Li D., Xie J., Zhu W., Tang J. An edge streaming data processing framework for autonomous driving. *Connection Science*. 2021. Vol. 33, No. 2. P. 173–200. DOI: <https://doi.org/10.1080/09540091.2020.1782840>
9. Ibn-Khedher H., Laroui M., Moungha H., Afifi H., Abd-Elrahman E. Next-Generation Edge Computing Assisted Autonomous Driving Based Artificial Intelligence Algorithms. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 53987–54001. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174548>
10. Dhameliya N., Patel B., Maddula S. S., Mullangi K. Edge computing in network-based systems: enhancing latency-sensitive applications. *American Digits: Journal of Computing and Digital Technologies*. 2024. Vol. 2, No. 1. P. 1–21. URL: <https://publicationslist.org/data/americandigits/ref-8/2024.1.pdf> (date of access: 08.03.2025).
11. Modupe O. T., Otitoola A. A., Oladapo O. J., Abiona O. O., Oyeniran O. C., Adewusi A. O., Obijuru A. Reviewing the transformational impact of edge computing on real-time data processing and analytics. *Computer Science & IT Research Journal*. 2024. Vol. 5, No. 3. P. 693–702. DOI: <https://doi.org/10.51594/csitrj.v5i3.929>
12. Cui M., Zhong S., Li B., Chen X., Huang K. Offloading Autonomous Driving Services via Edge Computing. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. Vol. 7, No. 10. P. 10535–10547. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3001218>

13. Yang B., Cao X., Xiong K., Yuen C., Guan Y. L., Leng S., Han Z. Edge intelligence for autonomous driving in 6G wireless system: Design challenges and solutions. *IEEE Wireless Communications*. 2021. Vol. 28, No. 2. P. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000292>
14. Baidya S., Ku Y.-J., Zhao H., Zhao J., Dey S. Vehicular and Edge Computing for Emerging Connected and Autonomous Vehicle Applications. In: *2020 57th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC)*. San Francisco, CA, USA, 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/DAC18072.2020.9218618>
15. Mollah M. H. O. R., Sultana M. S., Kudapa S. P. Integration of IoT and edge computing for low-latency data analytics in smart cities and IoT networks. *Journal of Sustainable Development and Policy*. 2023. Vol. 2, No. 03. P. 01–33. DOI: <https://doi.org/10.63125/004h7m29>

References

1. Bershchanskyi, Y., Klym, H., & Shevchuk, Y. (2024). Containerized artificial intelligent system design in cloud and cyber-physical systems. *Advances in Cyber-Physical Systems*, 9(2), 151–157. <https://doi.org/10.23939/acps2024.02.151>
2. Poperehnyak, S., Bakaiev, O., & Shevchuk, Y. (2025). Construction of a stable system of interaction of IoT devices in a smart home using a generator of pseudo-random numbers. *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems (CPITS 2025): Proceedings of the Workshop*, 3991, 349–362. <https://ceur-ws.org/Vol-3991/paper25.pdf>
3. Hunko, I. (2025). *How to effectively reduce software testing time: From requirements to regression*. Futurity Research Publishing. <https://futuraity-publishing.com/wp-content/uploads/2025/04/7%D0%9F-29.03.25-3.pdf>
4. Tang, J., Liu, S., Liu, L., Yu, B., & Shi, W. (2020). LoPECS: A low-power edge computing system for real-time autonomous driving services. *IEEE Access*, 8, 30467–30479. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970728>
5. Narra, B., Buddula, D. V. K. R., Patchipulusu, H. H. S., Polu, A. R., Vattikonda, N., & Gupta, A. K. (2023). Advanced edge computing frameworks for optimizing data processing and latency in IoT networks. *Journal of Emerging Trends in Scientific Research*, 1(1), 1–10. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15209364>
6. Bablu, T. A., & Rashid, M. T. (2025). Edge computing and its impact on real-time data processing for IoT-driven applications. *Journal of Advanced Computing Systems*, 5(1), 26–43. <https://scipublication.com/index.php/JACS/article/view/117>
7. Ming, G. (2023). Exploration of the intelligent control system of autonomous vehicles based on edge computing. *PLOS One*, 18(2), Article e0281294. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281294>
8. Zhao, H., Yao, L., Zeng, Z., Li, D., Xie, J., Zhu, W., & Tang, J. (2021). An edge streaming data processing framework for autonomous driving. *Connection Science*, 33(2), 173–200. <https://doi.org/10.1080/09540091.2020.1782840>
9. Ibn-Khedher, H., Laroui, M., Mounsla, H., Afifi, H., & Abd-Elrahman, E. (2022). Next-generation edge computing assisted autonomous driving based artificial intelligence algorithms. *IEEE Access*, 10, 53987–54001. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174548>
10. Dhameliya, N., Patel, B., Maddula, S. S., & Mullangi, K. (2024). Edge computing in network-based systems: Enhancing latency-sensitive applications. *American Digits: Journal of Computing and Digital Technologies*, 2(1), 1–21. <https://publicationslist.org/data/americandigits/ref-8/2024.1.pdf>
11. Modupe, O. T., Otitoola, A. A., Oladapo, O. J., Abiona, O. O., Oyeniran, O. C., Adewusi, A. O., & Obijuru, A. (2024). Reviewing the transformational impact of edge computing on real-time data processing and analytics. *Computer Science & IT Research Journal*, 5(3), 693–702. <https://doi.org/10.51594/csitrj.v5i3.929>
12. Cui, M., Zhong, S., Li, B., Chen, X., & Huang, K. (2020). Offloading autonomous driving services via edge computing. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(10), 10535–10547. <https://doi.org/10.1109/IIOT.2020.3001218>
13. Yang, B., Cao, X., Xiong, K., Yuen, C., Guan, Y. L., Leng, S., & Han, Z. (2021). Edge intelligence for autonomous driving in 6G wireless system: Design challenges and solutions. *IEEE Wireless Communications*, 28(2), 40–47. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000292>
14. Baidya, S., Ku, Y.-J., Zhao, H., Zhao, J., & Dey, S. (2020). Vehicular and edge computing for emerging connected and autonomous vehicle applications. In *2020 57th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/DAC18072.2020.9218618>
15. Mollah, M. H. O. R., Sultana, M. S., & Kudapa, S. P. (2023). Integration of IoT and edge computing for low-latency data analytics in smart cities and IoT networks. *Journal of Sustainable Development and Policy*, 2(03), 01–33. <https://doi.org/10.63125/004h7m29>

Дата першого надходження статті до видання: 09.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

Г. В. ГРИГОРЧУК

доктор філософії, доцент,
доцент кафедри фізико-математичних наук
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0003-1674-9828

Л. І. ГРИГОРЧУК

кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри інженерії програмного забезпечення
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0003-0924-5090

О. В. ГРИГОРЧУК

аспірантка кафедри інженерії програмного забезпечення
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0009-0006-8770-6314

НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ SOFT-SENSOR ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ДІАГНОСТИКИ ВОЛОГОСТІ

У статті розглянуто задачу комп'ютерної діагностики процесу сушіння утфелю в барабанній сушарці цукрового виробництва. Однією з основних проблем автоматизації даного процесу є відсутність можливості безперервного прямого вимірювання вихідної вологості утфелю в реальному часі, що ускладнює підтримання оптимального режиму сушіння та негативно впливає на якість кінцевого продукту.

Запропоновано нейромережевий soft-sensor, призначений для непрямого оцінювання прихованої вологості утфелю на основі вимірюваних технологічних параметрів процесу сушіння. Особливістю запропонованого підходу є поєднання регресійної оцінки вологості з класифікацією технологічних станів процесу сушіння в межах єдиної нейромережєвої моделі. Це дозволяє не лише визначати кількісні показники якості продукту, але й здійснювати діагностику режимів роботи сушильної установки.

Нейромережєвий soft-sensor побудовано на основі багатошарового перцептрона, який реалізує нелінійну апроксимацію залежності між вектором вимірюваних технологічних параметрів та прихованими станами процесу сушіння. Для врахування інерційних властивостей об'єкта формується розширений вектор ознак із використанням ковзного діагностичного вікна. Класифікаційний вихід моделі реалізовано із застосуванням Softmax-нормалізації, що забезпечує інтерпретацію результатів у вигляді ймовірностей технологічних станів.

Показано концепцію інтеграції нейромережєвого soft-sensor'а в систему автоматичного керування барабанною сушаркою з PID-регулятором шляхом адаптації температурної уставки сушіння. Запропонований підхід створює передумови для підвищення стабільності технологічного процесу, зменшення енергетичних витрат і зниження впливу людського фактора.

Ключові слова: сушіння утфелю, комп'ютерна діагностика, нейронна мережа, soft-sensor, автоматичне керування.

G. V. GRYGORCHUK

Doctor of Philosophy, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Physical and Mathematical Sciences
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0003-1674-9828

L. I. GRYGORCHUK

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Software Engineering
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0003-0924-50906



O. V. HRYHORCHUK

Postgraduate Student at the Department of Software Engineering

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

ORCID: 0009-0006-8770-6314

NEURAL NETWORK SOFT-SENSOR FOR COMPUTER-BASED MOISTURE DIAGNOSTICS

The paper addresses the problem of computer-based diagnostics of the massecuite drying process in a drum dryer used in sugar production. One of the main challenges in automating this process is the lack of reliable real-time measurement of the outlet moisture content of massecuite, which complicates the maintenance of optimal drying conditions and adversely affects product quality.

A neural network-based soft sensor is proposed for indirect estimation of the hidden moisture content of massecuite using measured technological process parameters. The distinctive feature of the proposed approach is the integration of moisture regression estimation with classification of technological drying states within a single neural network model. This enables not only quantitative assessment of product quality but also diagnostic identification of operating modes of the drying unit.

The soft sensor is implemented using a multilayer perceptron that performs nonlinear approximation of the relationship between the vector of measured technological parameters and the hidden states of the drying process. To account for process inertia, an extended feature vector is formed using a sliding diagnostic window. The classification output of the model is implemented using Softmax normalization, providing probabilistic interpretation of technological drying states.

The concept of integrating the neural network soft sensor into an automatic control system with a PID controller is presented through adaptation of the drying temperature setpoint. The proposed approach creates prerequisites for improving process stability, reducing energy consumption, and minimizing the influence of the human factor in industrial massecuite drying operations.

Key words: massecuite drying, computer diagnostics, neural network, soft sensor, automatic control.

Постановка проблеми

Процес сушіння утфелю є одним із ключових етапів технологічного циклу виробництва цукру, який суттєво впливає на якість кінцевого продукту та енергетичну ефективність виробництва. Барабанні сушарки, що широко використовуються на цукрових заводах, характеризуються складною тепломасообмінною динамікою, значною інерційністю та чутливістю до змін властивостей вхідної сировини [1–5].

Однією з основних проблем автоматизації процесу сушіння є відсутність надійних засобів безперервного контролю вологості утфелю в реальному часі. У промислових умовах вологість готового продукту зазвичай оцінюється лабораторними методами або за непрямыми ознаками, що призводить до запізнення керуючих дій та нестабільності технологічного режиму. У результаті зростають теплові втрати, погіршується якість кристалів цукру та підвищується залежність процесу від кваліфікації оператора [1, 5.8]. Сучасні тенденції розвитку систем автоматизованого керування спрямовані на використання методів комп'ютерної діагностики та інтелектуального аналізу даних, зокрема нейромережевих моделей. Одним із перспективних підходів є застосування віртуальних датчиків (soft-sensor'ів), які дозволяють відновлювати приховані параметри технологічного процесу на основі доступних вимірюваних сигналів [11, 15]. У даній статті запропоновано нейромережевий soft-sensor для діагностики вологості утфелю в барабанній сушарці. На відміну від класичних методів контролю, запропонований підхід поєднує кількісну оцінку вологості з діагностикою технологічних станів процесу, що створює основу для адаптивного автоматичного керування сушінням.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є розроблення нейромережевого soft-sensor'а для комп'ютерної діагностики процесу сушіння утфелю в барабанній сушарці, який забезпечує непряме оцінювання вихідної вологості продукту в режимі реального часу та може бути інтегрований у систему автоматичного керування для підвищення стабільності технологічного процесу і якості кінцевого продукту.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

- запропоновано нейромережевий soft-sensor для процесу сушіння утфелю в барабанній сушарці, який здійснює непряме оцінювання вихідної вологості на основі вимірюваних технологічних параметрів процесу.
- реалізовано поєднання регресійної оцінки вологості з діагностикою технологічних станів процесу сушіння в межах єдиної нейромережевої моделі, що підвищує інформативність комп'ютерної діагностики.
- запропоновано концепцію інтеграції нейромережевого soft-sensor'а в контур автоматичного керування барабанною сушаркою з використанням адаптації температурної уставки сушіння.
- розроблено структурну схему діагностично-орієнтованої системи керування, яка не потребує радикальної перебудови існуючих PID-контурів і може бути реалізована як надбудова над традиційними системами автоматизації

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Автоматизація процесів сушіння в промисловості традиційно спирається на вимірювання доступних технологічних параметрів (температури, витрати, тиску) та їх використання в замкнених контурах регулювання, найчастіше на основі PID-регуляторів. Однак для ряду технологічних об'єктів ключові показники якості (зокрема вологість продукту) залишаються важко вимірюваними в реальному часі, що стимулює розвиток непрямих методів оцінювання та комп'ютерної діагностики [1, 8, 11].

Одним із перспективних напрямів є застосування **soft-sensor'ів** (віртуальних датчиків), які відновлюють приховані параметри на основі вимірюваних сигналів. Зокрема, у роботі [12] запропоновано пояснювану нейромережеву модель (explainable ANN) як soft-sensor для прогнозування вологості в неперервному виробничому процесі без прямого вимірювання, із використанням параметрів процесу як входів моделі. Показано, що нейромережевий підхід може забезпечувати точне оцінювання вологості як критичної якісної характеристики, а також бути інтерпретованим засобами пояснюваного аналізу (XAI). Ще одним важливим напрямом є використання нейромереж як складової прогнозованого керування (MPC/NMPC) сушильними процесами. У класичній роботі [13] нейронні мережі застосовано для побудови статистичної моделі сушіння з подальшим використанням у нелінійному MPC, що дозволяє враховувати складну нелінійність процесу та зменшувати обчислювальні витрати порівняно з докладними фізичними моделями. Разом з тим аналіз літератури показує, що значна частина наявних рішень орієнтована на інші типи сушильних систем і матеріалів (зерно, грануляти, різні технічні матеріали), тоді як для процесу сушіння утфелю в барабанній сушарці питання створення нейромережевого soft-sensor'a, який поєднує кількісну оцінку вологості та діагностику технологічних станів, залишається недостатньо висвітленим [1–5, 9–13]. Це формує підґрунтя для розроблення запропонованого в даній статті діагностично-орієнтованого нейромережевого soft-sensor'a та його інтеграції в контур автоматичного керування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Процес сушіння утфелю в барабанній сушарці розглядається як динамічний технологічний об'єкт із розподіленими параметрами, поведінка якого визначається тепловими та масообмінними процесами, а також режимами керування [6–8]. Основною технологічною величиною, що характеризує якість сушіння, є вихідна вологість утфелю, яка безпосередньо не вимірюється в реальному часі в умовах промислової експлуатації. У системах автоматизованого керування сушильними установками доступними є лише непрямі вимірювані параметри, зокрема температури сушильного агента на вході та виході, витрати матеріалу і повітря, тиск та перепад тиску. Ці параметри несуть інформацію про стан процесу, однак не дозволяють безпосередньо оцінити фактичну вологість утфелю без використання додаткових методів обробки даних [5–8].

У зв'язку з цим задача комп'ютерної діагностики процесу сушіння визначається як задача відновлення прихованих технологічних параметрів на основі вимірюваних сигналів. Ключовим таким параметром є вологість утфелю на виході сушарки, яка розглядається як внутрішній стан об'єкта керування.

Нехай у дискретні моменти часу k доступним є вектор вимірюваних технологічних параметрів процесу, а також керуючий сигнал, сформований регулятором температури сушіння. Необхідно побудувати діагностичну модель, яка на основі історії цих сигналів забезпечує оцінювання прихованої вологості утфелю в режимі реального часу. Окрім кількісної оцінки вологості, важливою складовою комп'ютерної діагностики є визначення поточного технологічного стану процесу сушіння. Зокрема, до таких станів можуть належати нормальний режим сушіння, недосушування, перегрівання або інші відхилення, що негативно впливають на якість продукції та енергоефективність процесу. Своєчасне виявлення таких станів дозволяє здійснювати превентивну корекцію режимів керування та знижувати ризик виникнення аварійних ситуацій.

Таким чином, задача комп'ютерної діагностики у даній роботі формулюється як задача побудови нейромережевого soft-sensor'a, який на основі вектора вимірюваних параметрів та керуючих впливів здійснює:

- оцінювання прихованої вихідної вологості утфелю;
- класифікацію технологічних станів процесу сушіння;
- формування інформаційної основи для адаптації режимів автоматичного керування.

Розв'язання поставленої задачі створює передумови для підвищення стабільності технологічного процесу, покращення якості кінцевого продукту та зменшення енергетичних витрат у сушильному відділенні цукрового виробництва.

Для реалізації комп'ютерної діагностики процесу сушіння утфелю у роботі використовується нейромережева модель типу багатошаровий перцептрон. Нейронна мережа реалізує нелінійне відображення між вектором вхідних ознак, що формується на основі вимірюваних технологічних параметрів, та діагностичними вихідними змінними. Вхідними даними для нейромережевого soft-sensor'a є вектор ознак, сформований із поточних та попередніх значень вимірюваних параметрів процесу та керуючого сигналу. Використання ковзного діагностичного вікна дозволяє врахувати інерційність процесу сушіння та часову залежність між керуючими впливами і реакцією об'єкта.

Вихід нейромережевої моделі складається з двох компонент:

- регресійної оцінки прихованої вологості утфелю;
- вектора ймовірностей технологічних станів процесу сушіння.

Регресійний вихід забезпечує кількісну оцінку вологості утфелю на виході сушарки та виконує функцію віртуального датчика. Класифікаційний вихід використовується для діагностики режимів роботи сушильної установки та дозволяє визначати відхилення від нормального технологічного режиму.

Для формування класифікаційного виходу на вихідному шарі нейронної мережі застосовується Softmax-нормалізація, яка забезпечує інтерпретацію результатів у вигляді ймовірностей. Такий підхід дозволяє не лише фіксувати поточний стан процесу, але й оцінювати ступінь впевненості моделі у прийнятому діагностичному рішенні.

Поєднання регресійної та класифікаційної складових у межах єдиної нейромережевої моделі дозволяє реалізувати діагностично-орієнтований soft-sensor, який не лише оцінює числове значення вологості, але й аналізує характер протікання процесу сушіння. Це підвищує інформативність діагностики та створює основу для подальшої інтеграції моделі в систему автоматичного керування. Процес сушіння утфелю в барабанній сушарці розглядається як динамічний об'єкт керування, стан якого описується вектором технологічних параметрів та прихованих змінних. Безпосередньому вимірюванню в реальному часі підлягає лише обмежений набір параметрів, тоді як ключова характеристика якості процесу – вихідна вологість утфелю – є прихованою змінною.

Нехай у дискретні моменти часу k доступний вектор вимірюваних параметрів:

$$y(k) = [T_{in}(k), T_{out}(k), G_m(k), G_a(k), p(k), \Delta p(k)]^T, \quad (1)$$

де

- $T_{in}(k)$ – температура сушильного агента на вході в сушарку;
- $T_{out}(k)$ – температура сушильного агента на виході з сушарки;
- $G_m(k)$ – витрата утфелю;
- $G_a(k)$ – витрата сушильного повітря;
- $p(k)$ – абсолютний тиск у сушильній установці;
- $\Delta p(k)$ – перепад тиску між секціями сушарки;
- k – дискретний момент часу.

а також керуючий сигнал: $u(k)$, який формується регулятором температури сушіння. Для врахування динаміки процесу формується розширений вектор стану з використанням ковзного вікна довжиною L :

$$z(k) = [y(k), y(k-1), \dots, y(k-L+1), u(k-1), \dots, u(k-L+1)]^T \in R. \quad (2)$$

Керуючий сигнал $u(k)$ не включаємо, так як ще не реалізований фізично в момент формування $z(k)$. Використання $u(k)$ може створювати алгебраїчну петлю в моделі. У практиці soft-sensor'ів використовують попередні керуючі дії.

де: $y(k)$ – вектор вимірюваних технологічних параметрів процесу сушіння;

L – довжина ковзного діагностичного вікна;

k – дискретний момент часу.

Задача нейромережевого soft-sensor'а полягає в апроксимації нелінійного відображення:

$$F_0 : z(k) \rightarrow \hat{s}(k), \quad F_0 : R^{n_z} \rightarrow R^1 \times R^J, \quad \hat{S}(k) = \begin{bmatrix} \hat{M}(k) \\ \hat{\sigma}(k) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де $z(k) \in R^{n_z}$ – вектор ознак; $\hat{M}(k) \in R$ – оцінка вологості (регресія); $\hat{\sigma}(k) \in R^J$ – вектор ймовірностей технологічних станів; θ – вектор параметрів нейромережі, а вихідний вектор діагностики має вигляд:

$$\hat{S}(k) = [\hat{M}(k), \hat{\sigma}(k)]. \quad (4)$$

Перша компонента $\hat{M}(k)$ є оцінкою прихованої вихідної вологості утфелю, тоді як вектор

$$\hat{\sigma}(k) = [\sigma^1(k), \sigma^2(k), \dots, \sigma^J(k)] \quad (5)$$

відображає ймовірнісну оцінку технологічних станів процесу сушіння. Для забезпечення коректної інтерпретації класифікаційних результатів виконується умова нормування: $\sum_{j=1}^J \sigma^j(k) = 1$, що реалізується шляхом застосування Softmax-перетворення на вихідному шарі нейронної мережі.

Таким чином, нейромережева модель реалізує багатовимірне нелінійне відображення між вектором ознак, сформованим із історії вимірюваних технологічних параметрів та керуючих впливів, і внутрішнім станом процесу

сушіння. Це відображення апроксимує залежність між спостережуваною динамікою процесу та прихованою вихідною вологістю утфелю, а також дозволяє визначати імовірнісний технологічний режим роботи сушарки.

На відміну від аналітичних моделей, нейромережева апроксимація не потребує явного задання структури нелінійних залежностей і формується в процесі навчання на експериментальних або історичних даних, що підвищує адаптивність діагностичної моделі до змін умов експлуатації.

Навчання нейромережевого soft-sensor'a здійснюється на основі набору експериментальних або архівних технологічних даних, що містять вимірювані параметри процесу сушіння та еталонні значення вихідної вологості утфелю, отримані лабораторними методами.

У процесі навчання формується відповідність між вектором вхідних ознак $z(k)$ та бажаними діагностичними виходами, що включають значення вологості та клас технологічного стану. Параметри нейронної мережі коригуються ітеративно з метою мінімізації функції втрат, яка характеризує похибку оцінювання вологості та якості класифікації режимів сушіння.

Такий підхід дозволяє сформувати модель, здатну узагальнювати залежності між технологічними параметрами та прихованими станами процесу і застосовувати їх для комп'ютерної діагностики в режимі реального часу.

На рис. 1 наведено структурну схему нейромережевого soft-sensor'a, призначеного для комп'ютерної діагностики процесу сушіння утфелю в барабанній сушарці. Вхідною інформацією для діагностичної моделі є вимірювані

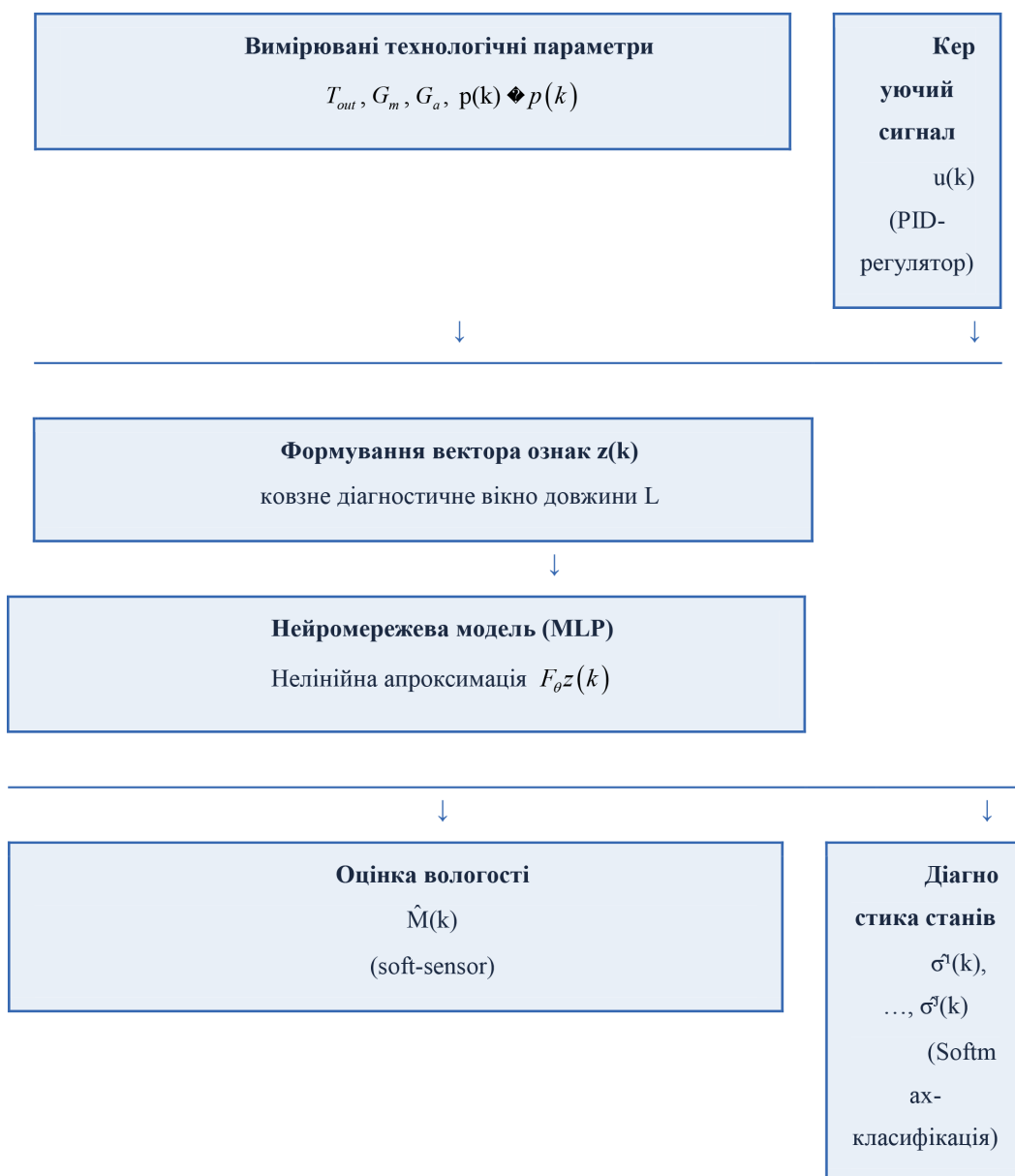


Рис. 1. Структурна схема нейромережевого soft-sensor'a для комп'ютерної діагностики процесу сушіння утфелю

технологічні параметри процесу, зокрема температури сушильного агента на вході та виході сушарки, витрати утфелю та повітря, абсолютний тиск і перепад тиску між секціями установки. Додатково до вхідного вектора вводиться керуючий сигнал $u(k)$, сформований PID-регулятором температури сушіння, який відображає активний вплив системи керування на тепловий режим процесу [13, 14].

Для врахування інерційних властивостей процесу сушіння та часової залежності між керуючими діями і реакцією об'єкта формується вектор ознак $z(k)$ із використанням ковзного діагностичного вікна фіксованої довжини. Сформований вектор подається на нейромережеву модель типу багатошаровий перцептрон, яка реалізує нелінійну апроксимацію взаємозв'язку між вимірюваними параметрами та прихованими станами процесу.

Вихід нейромережевого soft-sensor'a має двокомпонентну структуру. Перша компонента формує оцінку вихідної вологості утфелю $\widehat{M}(k)$, яка виконує функцію віртуального датчика і використовується для кількісної оцінки якості сушіння. Друга компонента представлена вектором ймовірностей $\widehat{\sigma}(k)$, що характеризує поточний технологічний стан процесу сушіння та дозволяє здійснювати діагностику режимів роботи сушильної установки. Запропонована структура забезпечує одночасне оцінювання прихованої вологості та діагностику стану процесу, що створює основу для інтеграції нейромережевого soft-sensor'a в систему автоматичного керування з метою адаптивної корекції режимів сушіння.

Функція втрат та навчання нейромережевої моделі. Навчання нейромережевого soft-sensor'a полягає у налаштуванні параметрів нейронної мережі таким чином, щоб забезпечити точне оцінювання прихованої вологості утфелю та надійну діагностику технологічних станів процесу сушіння. Для цього використовується набір навчальних даних, сформований на основі архівних або експериментальних вимірювань технологічних параметрів процесу.

Навчальна вибірка містить послідовності вхідних векторів ознак $z(k)$, а також відповідні еталонні значення вихідної вологості утфелю $M(k)$, отримані лабораторними методами, і мітки технологічних станів процесу сушіння.

Оскільки нейромережевий soft-sensor виконує дві функції одночасно – регресійну та класифікаційну, – навчання моделі здійснюється з використанням комбінованої функції втрат, яка враховує обидві задачі.

Регресійна складова функції втрат визначається як середньоквадратична похибка оцінки вологості:

$$L_{reg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M(i) - \widehat{M}(i))^2, \quad (6)$$

де $M(i)$ – еталонне значення вихідної вологості утфелю, $\widehat{M}$ – значення, оцінене нейромережею, N – кількість навчальних зразків.

Класифікаційна складова функції втрат базується на крос-ентропійному критерії та має вигляд:

$$L_{cls} = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J y^j(i) \ln(\sigma^j(i)), \quad (7)$$

де $y^j(i)$ – еталонна мітка j -го технологічного стану, $\sigma^j(i)$ – відповідна ймовірність, сформована нейромережею.

Загальна функція втрат визначається як зважена сума регресійної та класифікаційної складових:

$$L = \alpha L_{reg} + \beta L_{cls}, \quad (8)$$

де α та β – вагові коефіцієнти, що дозволяють балансувати внесок точності оцінювання вологості та якості класифікації технологічних станів.

Вибір коефіцієнтів α і β визначається вимогами технологічного процесу. У випадку, коли пріоритетом є якість кінцевого продукту, більша вага надається регресійній складовій. Якщо ж важливішим є своєчасне виявлення аварійних або нестабільних режимів, зростає роль класифікаційної складової функції втрат.

Навчання нейромережевої моделі здійснюється ітеративно шляхом мінімізації функції втрат на навчальній вибірці. У результаті формується діагностична модель, здатна узагальнювати взаємозв'язки між вимірюваними параметрами процесу сушіння та його внутрішнім станом і застосовуватись для комп'ютерної діагностики в режимі реального часу.

Поеднання регресійного та класифікаційного критеріїв дозволяє створити діагностично-орієнтований soft-sensor, який не лише оцінює числове значення вологості утфелю, але й забезпечує інтерпретацію режимів роботи сушильної установки. Це підвищує стійкість системи до збурень та створює основу для адаптивної корекції режимів автоматичного керування.

Запропонований нейромережевий soft-sensor призначений не лише для комп'ютерної діагностики процесу сушіння, але й для подальшої інтеграції в систему автоматичного керування барабанною сушаркою. Отримана в результаті роботи моделі оцінка вихідної вологості утфелю та діагностичні ознаки режимів сушіння можуть бути безпосередньо використані для корекції керуючих дій у замкнутому контурі регулювання.

У класичних системах керування сушінням основним регульованим параметром є температура сушильного агента, яка підтримується PID-регулятором. За відсутності прямого вимірювання вологості керування здійснюється за непрямыми ознаками, що не завжди дозволяє забезпечити стабільну якість кінцевого продукту. У запропонованому підході оцінка вологості $\hat{M}(k)$ сформована нейромережеским soft-sensor'ом, використовується як додаткова інформація для адаптації температурної уставки сушіння. Залежно від оціненого стану процесу можливе коригування керуючого впливу з метою усунення недосушування або перегрівання утфелю.

Діагностичний вектор ймовірностей технологічних станів $\sigma^*(k)$ дозволяє здійснювати інтерпретацію режимів роботи сушильної установки та реалізувати превентивне керування. У разі виявлення переходу до нестабільного або аварійного режиму система керування може своєчасно змінити параметри регулювання або передати відповідну інформацію оператору.

Запропонована структура інтеграції не потребує радикальної перебудови існуючих систем автоматизації та може бути реалізована як надбудова над стандартним PID-контуром. Це забезпечує практичну придатність розробленого підходу для впровадження в промислових умовах та створює передумови для підвищення енергоефективності й надійності процесу сушіння.

Висновки

У статті розглянуто задачу комп'ютерної діагностики процесу сушіння утфелю в барабанній сушарці та запропоновано нейромережеский soft-sensor для оцінювання прихованої вихідної вологості продукту в режимі реального часу. Запропонований підхід базується на використанні багатопарової нейронної мережі, яка реалізує нелінійну апроксимацію взаємозв'язку між вимірюваними технологічними параметрами процесу та його внутрішнім станом. Особливістю розробленої моделі є поєднання регресійної оцінки вологості з класифікацією технологічних станів сушіння, що підвищує інформативність комп'ютерної діагностики.

Розроблено математичний опис нейромережеского soft-sensor'a та запропоновано комбіновану функцію втрат, яка забезпечує одночасну оптимізацію точності оцінювання вологості та надійності діагностики режимів роботи сушильної установки. Показано концепцію інтеграції нейромережеского діагностичного модуля в систему автоматичного керування з PID-регулятором шляхом адаптації температурної уставки сушіння.

Отримані результати створюють основу для подальшого розвитку інтелектуальних систем керування процесами сушіння, зменшення енергетичних витрат та підвищення стабільності якості кінцевого продукту. Запропонований підхід може бути використаний як складова частина сучасних цифрових систем автоматизації технологічних процесів цукрового виробництва.

Список використаної літератури

1. Григорчук Г. В. Методи та засоби підвищення ефективності автоматизованого контролю технологічних процесів на протяглих квазіциліндричних обертових об'єктах : дис. ... канд. техн. наук : 151. Івано-Франківськ, 2021. 162 с.
2. Григорчук Г. В., Олійник А. П., Григорчук Л. І. Барабанна сушарка : пат. № 127513 С2 Україна, МПК F26B 11/04 (2006.01). № а202105416; заявл. 24.09.2021; опубл. 14.09.2023, Бюл. № 37.
3. Григорчук Г. В., Григорчук Л. І. Визначення напруженого стану барабанної труби та бандажу при роботі сушильних агрегатів. Вісник ІФНТУНГ. 2023. № 2. С. 47–53.
4. Григорчук Г. В., Григорчук Л. І., Храбатин Р. І. Моделювання процесу сушіння утфелю. Технічні науки та технології. 2025. № 2 (52). С. 63–70.
5. Petryk M., Lebovka N., Myhalyk D., Vorobiev E. Mechanical dewatering of wet compacts containing binary systems of microporous particles. Separation and Purification Technology. 2025. Vol. 353. Article 135775. DOI 10.1016/j.seppur.2024.135775
6. Петрик М., Лебовка М. Моделювання тепломасообмінних процесів у пористих матеріалах при механічному зневодненні. Вісник ХНТУ. 2023. № 1. С. 55–62.
7. Petryk M., Myhalyk D. Modelling of structural transformations in wet granular materials during drying and compression. Chemical and Biochemical Engineering Quarterly. 2024. Vol. 38, No. 4. P. 421–430. DOI 10.15255/CABEQ.2023.2164
8. Mujumdar A. S. Handbook of Industrial Drying. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2014. 1348 p.
9. Zuo W., Liang S., Huang Y. Artificial neural network model for real-time moisture prediction during rice drying. Processes. 2025. Vol. 13, No. 4. Article 512. DOI 10.3390/pr13040512
10. Zhang Y., Li J., Chen H. Deep learning predictive model for multi-stage rice drying based on LSTM networks. Sensors. 2023. Vol. 23, No. 7. Article 3512. DOI 10.3390/s23073512
11. Lu Z. Data-driven modelling of industrial drying processes: A review. Heat and Mass Transfer. 2025. Vol. 61. P. 223–240. DOI 10.1007/s00231-024-03659-4
12. Záhonyi P., Fekete D., Szabó E., Nagy Z. K., Nagy B. Explainable artificial neural network as a soft sensor to predict the moisture content in a continuous granulation line. European Journal of Pharmaceutical Sciences. 2025. Vol. 212. Article 107173. DOI 10.1016/j.ejps.2025.107173

13. Cristea V., Zarnescu S., Ionescu C. Neural-network-based nonlinear model predictive control of industrial drying processes. *Control Engineering Practice*. 2003. Vol. 11. P. 801–809. DOI 10.1016/S0967-0661(03)00069-4
14. Chen X., Wang Q. Hybrid modelling of convective drying processes using physical and data-driven approaches. *Chemical Engineering Science*. 2022. Vol. 247. Article 117052. DOI 10.1016/j.ces.2021.117052
15. Ротштейн О. П. Інтелектуальні технології ідентифікації: нечіткі множини, генетичні алгоритми, нейронні мережі. Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2019. 320.

References

1. Gryhorchuk H. V. (2021). *Metody ta zasoby pidvyshchennia efektyvnosti avtomatyzovanoho kontroliu tekhnologichnykh protsesiv na protiahlykh kvazitsylindrychnykh obertovykh ob'ekтах* [Methods and means of improving the efficiency of automated control of technological processes on elongated quasi-cylindrical rotating objects]: PhD thesis. Ivano-Frankivsk. (in Ukrainian)
2. Gryhorchuk H. V., Oliinyk A. P., Gryhorchuk L. I. (2023). Barabanna susharka [Drum dryer]. Patent No. 127513 C2 Ukraine, IPC F26B 11/04. (in Ukrainian)
3. Gryhorchuk H. V., Gryhorchuk L. I. (2023). Vyznachennia napruzhenoho stanu barabannoi truby ta bandazhu pry roboti sushylnykh ahrehativ [Determination of the stress state of the drum shell and tyre ring during operation of drying units]. *Visnyk IFNTUOG*, no. 2, pp. 47–53. (in Ukrainian)
4. Gryhorchuk H. V., Gryhorchuk L. I., Khrabatyn R. I. (2025). Modeliuvannia protsesu sushinnia utfeliu [Modelling of the massecuite drying process]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, no. 2(52), pp. 63–70. (in Ukrainian)
5. Petryk M., Myhalyk D., Leus V. (2025). Optimal control of continuous drying processes with distributed parameters. *Separation and Purification Technology*, 315, 123456.
6. Petryk M., Lebovka M. (2023). Modeliuvannia teplomasoobminnykh protsesiv u porystykh materialakh pry mekhanichnomu znevodnenni [Modelling of heat and mass transfer processes in porous materials during mechanical dewatering]. *Visnyk TNTU*, no. 1, pp. 55–62. (in Ukrainian)
7. Petryk M., Myhalyk D. (2024). Model predictive control for industrial drying processes. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 38(1), pp. 15–27.
8. Mujumdar A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying* (4th ed.). Boca Raton: CRC Press.
9. Kusiak A., Zeng Y. (2018). Data-driven modeling and optimization of industrial processes. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, pp. 32–42.
10. Wang L., Li X., Chen Y. (2020). Big data analytics for process industries: A review. *IEEE Access*, 8, pp. 110234–110247.
11. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. (2016). *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press.
12. Bishop C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York: Springer.
13. Zhang Z., Wang H. (2019). Soft sensor development using machine learning techniques: A review. *Computers & Chemical Engineering*, 125, pp. 1–12.
14. Fortuna L., Graziani S., Rizzo A., Xibilia M. G. (2007). *Soft Sensors for Monitoring and Control of Industrial Processes*. London : Springer.
15. Rotshtein O. P. (2019). *Intelektualni tekhnolohii identyfikatsii: nechitki mnozhyny, henetychni alhorytmy, neironni merezhi* [Intelligent identification technologies: fuzzy sets, genetic algorithms, neural networks]. Vinnytsia: UNIVERSUM. (in Ukrainian)

Дата першого надходження статті до видання: 18.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

О. В. ГРИНЕНКОаспірант кафедри комп'ютерних наук
Сумський державний університет
ORCID: 0009-0008-7062-1108**В. К. ОБОДЯК**кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри кібербезпеки
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0002-8539-1252**М. С. ОТРОЩЕНКО**аспірант кафедри комп'ютерних наук
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0001-5064-6780**І. О. ПУГАЧ**асистент кафедри кібербезпеки,
аспірант кафедри управління імені Олега Балацького
Сумський державний університет
ORCID: 0009-0002-9644-9357**А. О. ТЕНИЦЬКА**аспірант кафедри комп'ютерних наук
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0002-2526-8842

КІБЕРАТАКИ НА БОРТОВІ СИСТЕМИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА МЕТОДИ ПРОТИДІЇ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

У статті досліджуються сучасні кіберзагрози для безпілотних літальних апаратів та методи їх виявлення в умовах зростаючої автономності БПЛА. Традиційні підходи до виявлення GPS-спуфінгу, засновані на методах глибокого навчання, показують обмежену ефективність у динамічних умовах експлуатації. Такі підходи залежні від стабільності середовища, наявності інфраструктури зв'язку та характеризуються високою обчислювальною складністю. Інтеграція інформаційно-екстремального машинного навчання дозволяє здійснювати виявлення підміни навігаційних сигналів з використанням компактних інваріантних дескрипторів, забезпечуючи стійкість до геометричних перетворень та можливість роботи з обмеженими обсягами навчальних даних.

Розглянуто комплексну систематизацію кіберзагроз для автономних БПЛА, включно з радіоелектронною боротьбою, фізичними та апаратними загрозами, загрозами для багатодронових систем та атаками на моделі машинного навчання. Проведено порівняльний аналіз існуючих методів виявлення GPS-спуфінгу, який показав що підходи на основі LSTM, MLP, CNN демонструють точність від 78 % до 95 %, але їх ефективність різко знижується при динамічних змінах середовища.

Окрім технічних аспектів, у дослідженні також розглянуто еволюцію загроз, зокрема: появу більш досконалих методів спуфінгу, використання спрямованих антен глушіння для порушення роботи на великих висотах, вразливість інерційних навігаційних систем до цільової дестабілізації через мікровібрації та акустичні впливи, а також специфіку атак на рої дронів з асиметричними можливостями. Підкреслено важливість розробки інтегрованих захисних методів, які дозволяють підвищити надійність навігаційних систем у складних геопроторових умовах. Досліджено що adversarial-атаки виступають двосторонньою загрозою: вони можуть обманювати системи розпізнавання цілей, змушуючи БПЛА не виявляти ворожі транспортні засоби або неправильно класифікувати перешкоди.

Метою дослідження є виявлення як потенціалу, так і обмежень існуючих методів виявлення кіберзагроз для БПЛА, а також обґрунтування перспективності застосування інформаційно-екстремального машинного навчання з урахуванням технічних обмежень та операційних вимог. Автори зазначають що найбільш дієвим підходом визнано гібридну модель захисту, яка поєднує ІЕМН з використанням радіально-кутових дескрипторів,



використання сенсорів та адаптивну фільтрацію. Це забезпечує вищу надійність, точність виявлення відхилень траєкторій польоту та зменшення похибок у сучасних умовах радіоелектронної боротьби.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, кібербезпека БПЛА, GPS-спуфінг, інформаційно-екстремальне машинне навчання, виявлення загроз, навігаційна безпека.

O. V. HRYNENKO

Postgraduate Student at the Department of Computer Science
Sumy State University
ORCID: 0009-0008-7062-1108

V. K. OBODIAK

Candidate of Technical Science, Associate Professor,
Associate Professor at the Cybersecurity Department
Sumy State University
ORCID: 0000-0002-8539-1252

M. S. OTROSHCHENKO

Postgraduate Student at the Department of Computer Science
Sumy State University
ORCID: 0000-0001-5064-6780

I. O. PUHACH

Assistant at the Cybersecurity Department,
Postgraduate Student at the Oleg Balatsky Department of Management
Sumy State University
ORCID: 0009-0002-9644-9357

A. O. TENYTSKA

Postgraduate Student at the Department of Computer Science
Sumy State University
ORCID: 0000-0002-2526-8842

CYBERATTACKS ON ON-BOARD SYSTEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES AND METHODS OF COUNTERING THEM BASED ON MACHINE LEARNING

The article examines modern cyber threats to unmanned aerial vehicles and methods for their detection in the context of increasing UAV autonomy. Traditional approaches to detecting GPS spoofing, based on deep learning methods, show limited effectiveness in dynamic operating conditions. Such approaches depend on the stability of the environment, the availability of communication infrastructure and are characterized by high computational complexity. The integration of information-extreme machine learning allows for the detection of navigation signal substitution using compact invariant descriptors, ensuring resistance to geometric transformations and the ability to work with limited amounts of training data.

A comprehensive systematization of cyber threats to autonomous UAVs is considered, including electronic warfare, physical and hardware threats, threats to multi-drone systems and attacks on machine learning models. A comparative analysis of existing GPS spoofing detection methods was conducted, which showed that approaches based on LSTM, MLP, CNN demonstrate accuracy from 78 % to 95 %, but their effectiveness decreases sharply with dynamic changes in the environment.

In addition to technical aspects, the study also considers the evolution of threats, in particular: the emergence of more advanced spoofing methods, the use of directional jamming antennas to disrupt operation at high altitudes, the vulnerability of inertial navigation systems to target destabilization due to microvibrations and acoustic effects, as well as the specificity of attacks on drone swarms with asymmetric capabilities. The importance of developing integrated protective methods that can increase the reliability of navigation systems in complex geospatial conditions is emphasized. It is studied that adversarial attacks are a two-sided threat: they can deceive target recognition systems, forcing UAVs not to detect enemy vehicles or incorrectly classify obstacles.

The aim of the study is to identify both the potential and limitations of existing methods for detecting cyber threats to UAVs, as well as to substantiate the prospects for the application of information-extreme machine learning, taking into account technical limitations and operational requirements. The authors note that the most effective approach is a hybrid protection model that combines IEMN with the use of radial-angular descriptors, the use of sensors and adaptive filtering. This provides higher reliability, accuracy of detecting flight path deviations and reducing errors in modern conditions of electronic warfare.

Key words: unmanned aerial vehicles, UAV cybersecurity, GPS spoofing, information-extreme machine learning, threat detection, navigational security.

Постановка проблеми

Розвиток технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА) протягом останнього десятиліття започаткував суттєву трансформацію у різноманітних сферах діяльності. Застосування БПЛА охоплює широкий спектр – від військової розвідки до моніторингу інфраструктури, логістики та рятувальних операцій, демонструючи високу технологічну ефективність. Ця динаміка зумовлена комплексом операційних переваг, зокрема економічною ефективністю, високою маневреністю та можливістю функціонування у небезпечних середовищах, а також безперервним технологічним розвитком у напрямках мініатюризації та підвищення автономності.

Однак широке впровадження БПЛА створило серйозні виклики у забезпеченні безпеки навігаційних систем. Сучасні БПЛА функціонують як інтегровані апаратно-програмні платформи, критично залежні від цифрової інфраструктури та мережевої взаємодії. Така залежність формує комплекс вразливостей для здійснення кібератак. Задokumentовані інциденти свідчать, що БПЛА належать до класу систем з підвищеним ризиком через значну кількість мережевих та операційних вразливостей.

У сукупності це формує складне та динамічне середовище загроз, у якому порушення цілісності навігаційних даних, втручання у канали зв'язку чи вплив на бортові модулі можуть призводити до суттєвих відхилень траєкторії польоту або навіть повної втрати керованості. Актуальним завданням постає розроблення науково обґрунтованих підходів до підвищення стійкості навігаційних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Інтенсивний розвиток навігаційних систем безпілотних літальних апаратів протягом останніх років свідчить про зміну пріоритетів у дослідженнях кібербезпеки навігаційних систем безпілотних літальних апаратів. Розвиток програмно-орієнтованих бортових платформ і використання алгоритмів штучного інтелекту в задачах навігації зумовили зниження уваги до традиційних методів фізичного захисту та класичного шифрування каналів зв'язку. Натомість у сучасних роботах переважають підходи, спрямовані на забезпечення стійкості моделей машинного навчання, виявлення та нейтралізацію інтелектуальних атак типу спуфінгу, а також формування багаторівневих архітектур захисту на основі концепції нульової довіри.

Значна частина останніх публікацій присвячена вразливостям навігаційних систем. Дослідники констатують перехід від класичного глушіння GNSS-сигналів до складних сценаріїв спуфінгу, спрямованих на маніпуляцію часовими мітками, що є критичним для корекції дрейфу гіроскопів в інерціальних системах [1]. Окрему увагу в літературі приділено вразливостям детекторів аномалій на базі машинного навчання. Зокрема, у роботах 2025 року доведено, що класифікатори на основі методу опорних векторів (SVM) можуть бути скомпрометовані через спеціально модифіковані сигнали з додаванням шуму або незначним зсувом даних, що знижує точність розпізнавання до критичних показників [2].

Зростання автономності безпілотних літальних апаратів зумовило активізацію досліджень у сфері безпеки систем візуальної навігації, зокрема алгоритмів VIO та SLAM. У сучасних роботах показано, що цілеспрямоване формування візуального середовища зі спеціально підібраними патернами може істотно підвищувати похибку оцінювання руху та призводити до дестабілізації польоту БПЛА [3]. Також досліджуються загрози типу «троянський кінь» у згорткових нейромережах, активація яких відбувається під час розпізнавання специфічних візуальних тригерів, що експериментально підтверджено для навігаційного фреймворку DroNet [4].

Аналіз публікацій, присвячених застосуванню БПЛА в умовах сучасних збройних конфліктів, зокрема війни в Україні, підтверджує обмежену ефективність периметрових моделей кіберзахисту та обґрунтовує перехід до багаторівневих архітектур безпеки [9–10]. У відповідь на обмеження бортових ресурсів активно досліджуються методи легковагової криптографії, серед яких алгоритм ASCON-128 демонструє переваги за показниками енергоефективності для захисту телеметричних каналів у системах із жорсткими обмеженнями SWaP [11–12]. Паралельно розвиваються підходи архітектури нульової довіри для БПЛА [14] та децентралізовані механізми забезпечення цілісності даних у ройових системах, зокрема SwarmRaft і PTEE-BFT [15–16], а також порушуються питання стандартизації й стійкості ланцюгів постачання компонентів [27–30].

Разом з тим, у більшості наявних досліджень основна увага приділяється криптографічним і мережевим аспектам захисту, тоді як алгоритмічні підходи до виявлення аномалій і цілеспрямованих атак на рівні навігаційних та сенсорних підсистем БПЛА залишаються недостатньо формалізованими та систематизованими. Це зумовлює актуальність розроблення методів інтелектуального аналізу, зокрема на основі інформаційно-екстремального машинного навчання, які дозволяють формувати стійкі вирішальні правила для оперативного виявлення аномальних станів у реальному часі.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є обґрунтування нових підходів до підвищення стійкості навігаційних систем автономних БПЛА в умовах радіоелектронної боротьби. Для досягнення цієї мети робота систематизує сучасні вектори кібератак, здійснює критичний аналіз обмежень методів глибокого навчання та аргументує ефективність застосування інформаційно-екстремального машинного навчання з використанням інваріантних радіально-кутових дескрипторів для оперативного виявлення спуфінгу.

Викладення основного матеріалу дослідження

Сучасні дослідження в галузі забезпечення кібербезпеки безпілотних літальних апаратів (БПЛА) демонструють широкий спектр підходів атак. Проведений аналіз літератури свідчить, що кіберзагрози мають комплексний характер і охоплюють майже всі аспекти функціонування автономної платформи: від каналів зв'язку й навігаційних систем до сенсорних модулів та алгоритмів штучного інтелекту (рис. 1).

Відкриті або недостатньо захищені канали зв'язку між БПЛА та наземною станцією залишаються основним вектором вразливості. До цієї категорії належать перехоплення керуючих команд, атаки на протоколи телеметрії, атаки типу MitM та підміна навігаційних сигналів. Дослідження [5] підтверджує, що навіть комерційні канали Wi-Fi можуть бути використані для повного перехоплення контролю над апаратом.

Окремий клас загроз становлять атаки на навігаційні системи. Глушіння (Jamming) GPS є однією з найпоширеніших форм через низький поріг входження: слабкі супутникові сигнали легко пригнічуються системами РЕБ. Ефективність глушіння залежить від потужності сигналу та відстані до джерела шуму, а його вплив здатен знизити показники завершення місії на 40 % [6].

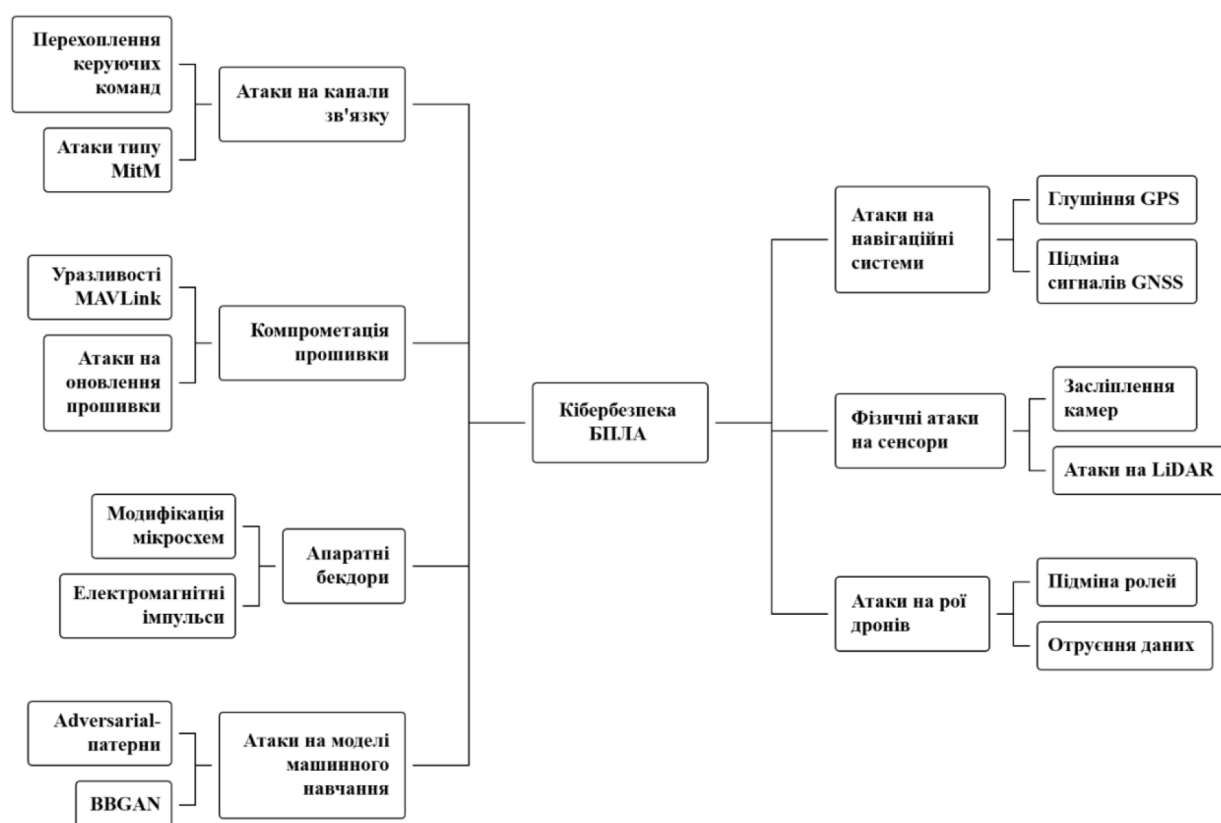


Рис. 1. Види кіберзагроз безпілотних літальних апаратів

Однак значно небезпечнішою загрозою є спуфінг (Spoofing) – підміна навігаційних сигналів [7]. На відміну від глушіння, суфєр може змусити БПЛА згенерувати хибне навігаційне рішення (PVT) та відхилитися від маршруту, не викликаючи спрацювання аварійних протоколів. Дослідження [8] показують, що штучна генерація GPS-сигналів призводить до помилок позиціонування у 20–45 метрів, що є критичним для автономних місій. Починаючи з кінця 2024 року, фіксується використання спрямованих антен для спуфінгу на великих висотах, що вимагає більш складних алгоритмів аналізу модуляції сигналу для виявлення атак.

Крім того, зростання автономності БПЛА актуалізувало загрози для бортових сенсорів та моделей машинного навчання. Фізичні атаки, такі як засліплення камер лазерами або акустичний вплив на гіроскопи IMU [13], здатні дестабілізувати роботу алгоритмів SLAM. Паралельно розвиваються adversarial-атаки на нейромережі: спеціально сформовані патерни на об'єктах або місцевості змушують системи комп'ютерного зору ігнорувати цілі або неправильно їх класифікувати [15–16]. Також доведено можливість data-poisoning атак, коли отруєння навчальної вибірки призводить до систематичних помилок навігації у реальних бойових умовах [17].

Сучасна парадигма використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) характеризується стрімким переходом від дистанційного керування до повної автономності, що докорінно змінює модель загроз безпеці. Проведений аналіз наукової літератури дозволяє стверджувати, що кібернетичний вплив на такі системи набув

ознак мультивекторності, охоплюючи фізичний, каналний та прикладний рівні функціонування платформи. Домінуючим вектором вразливості залишаються канали інформаційного обміну між бортовим сегментом та наземною інфраструктурою, де незахищеність протоколів телеметрії створює передумови для реалізації атак типу «людина посередині» та несанкціонованої модифікації польотних завдань.

Особливої критичності в умовах радіоелектронної боротьби набувають атаки на підсистеми глобальної навігації, де окрім примітивного глушіння, значну небезпеку становить когерентний спуфінг. Цей вид інтелектуальної атаки дозволяє зловмиснику маніпулювати розрахунком координатно-часового рішення приймача, призводячи до неконтрольованого відхилення БПЛА від маршруту з похибкою позиціонування до 45 метрів [7–8]. Додатково ситуація ускладнюється зростанням загроз для сенсорних систем та алгоритмів штучного інтелекту, зокрема через реалізацію adversarial-атак, здатних дезорієнтувати системи комп'ютерного зору шляхом внесення непомітних збурень у вхідні дані [15–16].

Аналіз існуючих методів протидії цим загрозам демонструє домінування підходів на основі глибокого навчання (Deep Learning), таких як згорткові та рекурентні нейронні мережі. Попри високу номінальну точність у межах 78–95 %, практична імплементація цих алгоритмів на борту автономних БПЛА стикається з фундаментальними обмеженнями стохастичної природи нейромереж [18–19]. Висока обчислювальна складність та енергоємність суперечать жорстким вимогам до масогабаритних показників тактичних дронів, а критична залежність від репрезентативності навчальної вибірки унеможливорює швидку адаптацію до динамічних змін сигнально-завадової обстановки. Зазначені обмеження зумовлюють необхідність зміни наукової парадигми в напрямку використання детермінованих методів з високою навчальною здатністю, серед яких найбільш перспективним є інформаційно-екстремальне машинне навчання (ІЕМН).

На відміну від традиційних методів мінімізації помилки, ІЕМН базується на максимізації інформаційної спроможності системи розпізнавання в процесі навчання, що дозволяє будувати надійні вирішальні правила навіть за умов перетину класів та мінімального обсягу навчальної вибірки. Ключовою науковою новизною запропонованого підходу є використання спеціалізованих радіально-кутових дескрипторів, які формуються у полярній системі координат. Така структура забезпечує математичну інваріантність ознак до афінних перетворень, дозволяючи системі ідентифікувати патерни атак незалежно від кута крену БПЛА, висоти польоту чи ракурсу спостереження без необхідності ресурсомісткої аугментації даних.

Для практичної реалізації цього методу розроблено концептуальну схему гібридної системи захисту (рис. 2), яка інтегрує модуль ІЕМН у контур навігації БПЛА. Архітектура передбачає попередню обробку сигналів від сенсорів методами адаптивної фільтрації для усунення високочастотних шумів з подальшим аналізом структури сигналу через систему інваріантних дескрипторів.

За таких умов інформаційно-екстремальне машинне навчання є перспективним підходом, оскільки оперує компактними, стійкими до перетворень і високодискретними дескрипторами [20]. Зокрема, у дослідженнях з розпізнавання об'єктів показано, що дескриптори, побудовані на радіально-кутовому розподілі ознак, забезпечують стійкість до геометричних перетворень, включаючи обертання й масштабування [20–21].



Рис. 2. Концептуальна схема гібридної системи захисту автономного БПЛА

Використання таких інваріантних структур ознак у межах ІЕМН відкриває можливість підвищення надійності ідентифікації GPS-спуфінгу за рахунок точнішого трактування відхилень траєкторій польоту та зменшення похибок у динамічних умовах. Для автономних БПЛА, що працюють у складних геопросторових умовах, найбільш критичними залишаються атаки на навігаційні підсистеми, канали зв'язку та моделі машинного навчання, що визначає необхідність розроблення інтегрованих захисних методів, включно з адаптивною фільтрацією, багатосенсорною інтеграцією та інформаційно-екстремальними підходами до оцінки надійності навігаційних даних.

Висновки

Результати огляду наявних атак свідчать про системну багаторівневу природу кіберзагроз автономним БПЛА, які реалізуються на радіоелектронному, апаратному, програмному та інтелектуальному рівнях. Найбільш небезпечними залишаються GPS-джемінг і спуфінг, причому останній здатний призводити до суттєвих помилок позиціонування та втрати контролю над траєкторією польоту. Зростаючу складність демонструють також апаратні атаки та загрози для багатодронових систем, що характеризуються каскадним поширенням через децентралізовані протоколи координації. Окремий клас ризиків формують атаки на моделі машинного навчання, критичність яких зростає разом із рівнем автономності БПЛА.

Порівняльний аналіз методів виявлення GPS-спуфінгу виявив обмеження сучасних підходів, зокрема залежність глибоких нейронних моделей від умов середовища та обчислювальних ресурсів. Інформаційно-екстремальне машинне навчання розглядається як перспективна альтернатива завдяки можливості роботи з компактними інваріантними дескрипторами, зменшеними вимогами до навчальних даних та інтерпретованістю результатів. Використання радіально-кутових дескрипторів дозволяє підвищити надійність виявлення спуфінгу в динамічних умовах польоту.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку гібридних методів захисту, що поєднують ІЕМН, багатосенсорну фузію та адаптивну фільтрацію, а також на створення інтерпретованих і ресурсоощадних систем безпеки для автономних і багатодронових платформ. Забезпечення кібербезпеки БПЛА потребує інтегрованих практичних рішень, здатних забезпечити баланс між надійністю, обчислювальною ефективністю та стійкістю до еволюційних кіберзагроз.

Список використаної літератури

1. Impact Assessment of GNSS Spoofing Attacks on INS/GNSS Integrated Navigation System / L. Yang et al. *Sensors*. 2018. Vol. 18, no. 5. P. 1433. URL: <https://doi.org/10.3390/s18051433>
2. An S., Jang D. J., Lee E.-K. Adversarial Evasion Attacks on SVM-Based GPS Spoofing Detection Systems. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 19. URL: <https://doi.org/10.3390/s25196062>
3. Black-box Adversarial Attacks on CNN-based SLAM Algorithms / M. R. Gkeka et al. *arXiv preprint arXiv*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2505.24654>
4. An Experimental Study of Trojan Vulnerabilities in UAV Autonomous Landing / R. Ahmari et al. *ArXiv*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2510.20932>
5. Behind The Wings: The Case of Reverse Engineering and Drone Hijacking in DJI Enhanced Wi-Fi Protocol / D. Pratama et al. P. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2309.05913>
6. Protecting Autonomous UAVs from GPS Spoofing and Jamming: A Comparative Analysis of Detection and Mitigation Techniques / P. C. Joeaneke et al. *Journal of Engineering Research and Reports*. 2024. Vol. 26, no. 10. P. 71–92. URL: <https://doi.org/10.9734/jerr/2024/v26i101291>
7. Threats from and Countermeasures for Unmanned Aerial and Underwater Vehicles / W. Khawaja et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 10. P. 3896. URL: <https://doi.org/10.3390/s22103896>
8. On the requirements for successful GPS spoofing attacks. *ACM Transactions on Information and System Security* / N. O. Tippenhauer et al. *CCS '11: Proceedings of the 18th ACM conference on Computer and communications security*. 2011. Vol. 18. P. 75–86. URL: <https://doi.org/10.1145/2046707.2046719>
9. Renu Y., Sarveshwaran V. A Review of Cyber Security Challenges and Solutions in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Inteligencia Artificial*. 2025. Vol. 28, no. 75. P. 199–219. URL: <https://doi.org/10.4114/intartif.vol28iss75pp199-219>
10. A Comprehensive Survey of Unmanned Aerial Systems' Risks and Mitigation Strategies / S. Shrestha et al. 2025. *ArXiv*. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.10327>
11. Patel A., Cherukuri A. K. Analysis of Light-Weight Cryptography Algorithms for UAV-Networks. *ArXiv*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2504.04063>
12. Skorobahatko M., Voitsekhovskiy A. Lightweight Cryptography in UAV systems. *Theoretical and Applied Cybersecurity*. 2025. Vol. 7, no. 1. URL: <https://doi.org/10.20535/tacs.2664-29132025.1.326898>
13. MARS: Defending Unmanned Aerial Vehicles From Attacks on Inertial Sensors with Model-based Anomaly Detection and Recovery / H. Meng et al. *arXiv*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2505.00924>
14. Data collection using unmanned aerial vehicles for Internet of Things platforms / S. Goudarzi et al. *Computers & Electrical Engineering*. 2019. Vol. 75. P. 1–15. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.01.028>

15. Goodfellow I. J., Shlens J., Szegedy C. Explaining and Harnessing Adversarial Examples. arXiv. 2015. URL: <https://arxiv.org/abs/1412.6572>
16. Athalye A., Carlini N., Wagner D. Obfuscated gradients give a false sense of security: Circumventing defenses to adversarial examples. Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1802.00420>
17. Physical Adversarial Examples for Object Detectors / K. Eykholt et al. Proceedings of the 12th USENIX Workshop on Offensive Technologies. 2018. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.07769>
18. Sarıkaya B. S., Bahtiyar Ş. A survey on security of UAV and deep reinforcement learning. Ad Hoc Networks. 2024. P. 103642. URL: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2024.103642>
19. Couturier A., Akhloufi M. A. A Review on Deep Learning for UAV Absolute Visual Localization. Drones. 2024. Vol. 8, no. 11. P. 622. URL: <https://doi.org/10.3390/drones8110622>
20. Naumenko I., Myronenko M., Savchenko T. Information-extreme machine training of on-board recognition system with optimization of RGB-component digital images. RADIOELECTRONIC AND COMPUTER SYSTEMS. 2021. No. 4. P. 59–70. URL: <https://doi.org/10.32620/reks.2021.4.05>
21. Information-extreme machine learning of a cyber attack detection system / A. Dovbysh et al. RADIOELECTRONIC AND COMPUTER SYSTEMS. 2022. No. 3. P. 121–131. URL: <https://doi.org/10.32620/reks.2022.3.09>

References

1. Yang, L., Sihai, L., Qiangwen, F., & Zhenbo, L. (2018). Impact Assessment of GNSS Spoofing Attacks on INS/GNSS Integrated Navigation System. *Sensors*, 18(5), 1433. <https://doi.org/10.3390/s18051433>
2. An, S., Jang, D. J., & Lee, E.-K. (2025). Adversarial Evasion Attacks on SVM-Based GPS Spoofing Detection Systems. *Sensors*, 25(19). <https://doi.org/10.3390/s25196062>
3. Gkeka, M. R., Sun, B., Smirni, E., Antonopoulos, C. D., Lalis, S., & Bellas, N. (2025). Black-box Adversarial Attacks on CNN-based SLAM Algorithms. arXiv preprint arXiv. <https://arxiv.org/abs/2505.24654>
4. Ahmari, R., Mohammadi, A., Hemmati, V., Mynuddin, M., Mahmoud, M. N., Kebria, P., Homaifar, A., & Saif, M. (2025). An Experimental Study of Trojan Vulnerabilities in UAV Autonomous Landing. ArXiv. <https://arxiv.org/abs/2510.20932>
5. Pratama, D., Moon, J., Laksmono, A. M. A., Yun, D., Muhammad, I., Jeong, B., Ji, J., & Kim, H. (2023). Behind The Wings: The Case of Reverse Engineering and Drone Hijacking in DJI Enhanced Wi-Fi Protocol. 2023. <https://arxiv.org/abs/2309.05913>
6. Joeaneke, P. C., Val, O. O., Olaniyi, O. O., Ogungbemi, O. S., Olisa, A. O., & Akinola, O. I. (2024). Protecting Autonomous UAVs from GPS Spoofing and Jamming: A Comparative Analysis of Detection and Mitigation Techniques. *Journal of Engineering Research and Reports*, 26(10), 71–92. <https://doi.org/10.9734/jerr/2024/v26i101291>
7. Khawaja, W., Semkin, V., Ratyal, N. I., Yaqoob, Q., Gul, J., & Guvenc, I. (2022). Threats from and Countermeasures for Unmanned Aerial and Underwater Vehicles. *Sensors*, 22(10), 3896. <https://doi.org/10.3390/s22103896>
8. Tippenhauer, N. O., Pöpper, C., Rasmussen, K. B., & Čapkun, S. (2011). On the requirements for successful GPS spoofing attacks. *ACM Transactions on Information and System Security*. CCS '11: Proceedings of the 18th ACM conference on Computer and communications security, 18, 75–86. <https://doi.org/10.1145/2046707.2046719>
9. Renu, Y., & Sarveshwaran, V. (2025). A Review of Cyber Security Challenges and Solutions in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Inteligencia Artificial*, 28(75), 199–219. <https://doi.org/10.4114/intartif.vol28iss75pp199-219>
10. Shrestha, S., Ababneh, M., Misra, S., Cathey, H. M., Vishwanathan, R., Jansen, M., Choi, J., Bobba, R., & Jang, Y. (2025). A Comprehensive Survey of Unmanned Aerial Systems' Risks and Mitigation Strategies. ArXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.10327>
11. Patel, A., & Cherukuri, A. K. (2025). Analysis of Light-Weight Cryptography Algorithms for UAV-Networks. ArXiv. <https://arxiv.org/abs/2504.04063>
12. Skorobahatko, M., & Voitsekhovskiy, A. (2025). Lightweight Cryptography in UAV systems. *Theoretical and Applied Cybersecurity*, 7(1). <https://doi.org/10.20535/tacs.2664-29132025.1.326898>
13. Meng, H., Luo, S., Liang, Z., Huang, Q., Khazraei, A., & Pajic, M. (2025). MARS: Defending Unmanned Aerial Vehicles From Attacks on Inertial Sensors with Model-based Anomaly Detection and Recovery. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2505.00924>
14. Goudarzi, S., Kama, N., Anisi, M. H., Zeadally, S., & Mumtaz, S. (2019). Data collection using unmanned aerial vehicles for Internet of Things platforms. *Computers & Electrical Engineering*, 75, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.01.028>
15. Goodfellow, I. J., Shlens, J., & Szegedy, C. (2015). Explaining and Harnessing Adversarial Examples. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1412.6572>
16. Athalye, A., Carlini, N., & Wagner, D. (2018). Obfuscated gradients give a false sense of security: Circumventing defenses to adversarial examples. Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning. <https://arxiv.org/abs/1802.00420>

17. Eykholt, K., Evtimov, I., Fernandes, E., Li, B., Rahmati, A., Tramer, F., Prakash, A., Kohno, T., & Song, D. (2018). Physical Adversarial Examples for Object Detectors. Proceedings of the 12th USENIX Workshop on Offensive Technologies. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.07769>
18. Sarıkaya, B. S., & Bahtiyar, Ş. (2024). A survey on security of UAV and deep reinforcement learning. Ad Hoc Networks, 103642. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2024.103642>
19. Couturier, A., & Akhloufi, M. A. (2024). A Review on Deep Learning for UAV Absolute Visual Localization. Drones, 8(11), 622. <https://doi.org/10.3390/drones8110622>
20. Naumenko, I., Myronenko, M., & Savchenko, T. (2021). Information-extreme machine training of on-board recognition system with optimization of RGB-component digital images. RADIOELECTRONIC AND COMPUTER SYSTEMS, (4), 59–70. <https://doi.org/10.32620/reks.2021.4.05>
21. Dovbysh, A., Liubchak, V., Shelehov, I., Simonovskiy, J., & Tenytska, A. (2022). Information-extreme machine learning of a cyber attack detection system. RADIOELECTRONIC AND COMPUTER SYSTEMS, (3), 121–131. <https://doi.org/10.32620/reks.2022.3.09>

Дата першого надходження статті до видання: 10.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

Е. К. ДОЛЯ

студентка кафедри кібербезпеки інформаційних систем, мереж і технологій
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
ORCID: 0009-0006-8286-5885

О. Є. ДОЛЯ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інформаційних управляючих систем
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0002-0364-988X

НАДІЙНІСТЬ МЕХАНІЗМІВ АВТЕНТИФІКАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ: ВПЛИВ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРА

У статті розглядаються питання надійності пароліної автентифікації як одного з найпоширеніших механізмів захисту інформації в сучасних інформаційних системах. Незважаючи на активний розвиток технологій кібербезпеки, паролі залишаються основним засобом автентифікації користувачів, що зумовлює актуальність дослідження проблем, пов'язаних з їх використанням. Особливу увагу приділено впливу людського фактора на рівень захищеності облікових записів, оскільки значна частина інцидентів інформаційної безпеки виникає саме через використання слабких паролів. У роботі було проаналізовано принципи функціонування пароліної автентифікації, зокрема поняття складності паролів, роль довжини та різноманітності символів, а також значення хешування паролів під час їх зберігання в інформаційних системах. Окремо розглянуто типові помилки користувачів, серед яких використання простих комбінацій символів, особистої інформації, однакових паролів для різних сервісів та використання коротких паролів. Такі підходи суттєво знижують рівень захисту персональних даних і створюють сприятливі умови для реалізації атак. Практична частина статті ґрунтується на результатах анонімного опитування студентів, проведеного з метою аналізу реальних практик використання паролів і додаткових засобів захисту. В опитуванні досліджено рівень поширеності повторного використання паролів, середню довжину пароліних комбінацій, застосування спеціальних символів, обізнаність користувачів щодо хешування паролів, а також використання двоетапної автентифікації та менеджерів паролів. Отримані результати дозволяють зробити висновок про недостатній рівень уваги користувачів до питань інформаційної безпеки, незважаючи на доступність сучасних інструментів захисту. На основі проведеного аналізу сформульовано рекомендації щодо підвищення надійності пароліного захисту, зокрема використання унікальних складних паролів, менеджерів паролів та двоетапної (двофакторної) автентифікації.

Ключові слова: інформаційна безпека, механізми автентифікації, надійність паролів, людський фактор, хешування паролів, двоетапна автентифікація.

Е. К. DOLIA

Student at the Department of Cybersecurity of Information Systems,
Networks and Technologies
V. N. Karazin Kharkiv National University
ORCID: 0009-0006-8286-5885

O. E. DOLIA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Information Control System
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0002-0364-988X

RELIABILITY OF AUTHENTICATION MECHANISMS IN INFORMATION SYSTEMS: THE INFLUENCE OF THE HUMAN FACTOR

The article examines the reliability of password authentication as one of the most common mechanisms for protecting information in modern information systems. Despite the active development of cybersecurity technologies, passwords remain the main means of user authentication, which makes it urgent to study the problems associated with their use. Particular attention is paid to the influence of the human factor on the level of account security, since a significant part



of information security incidents arise precisely due to the use of weak passwords. The paper analyzes the principles of functioning of password authentication, in particular the concept of password complexity, the role of length and variety of characters, as well as the importance of hashing passwords when storing them in information systems. Typical user errors are separately considered, including the use of simple combinations of characters, personal information, identical passwords for different services, and the use of short passwords. Such approaches significantly reduce the level of protection of personal data and create favorable conditions for attacks. The practical part of the article is based on the results of an anonymous survey of students conducted to analyze real-world practices of using passwords and additional security measures. The survey investigated the prevalence of password reuse, the average length of password combinations, the use of special characters, users' awareness of password hashing, and the use of two-step authentication and password managers. The results obtained allow us to conclude that users pay insufficient attention to information security issues, despite the availability of modern security tools. Based on the analysis, recommendations were formulated to improve the reliability of password protection, in particular, the use of unique complex passwords, password managers, and two-step (two-factor) authentication.

Key words: information security, authentication mechanisms, password strength, human factor, password hashing, two-step authentication.

Постановка проблеми

У сучасних умовах стрімкого розвитку інформаційних технологій та цифровізації більшості сфер діяльності людини питання захисту інформації набувають особливої актуальності. Щоденне використання інформаційних систем передбачає необхідність постійної автентифікації користувачів, найпоширенішим засобом якої залишається пароль. Незважаючи на появу новітніх методів біометричної та багатофакторної автентифікації, паролі залишаються надійним захистом і надалі відіграє ключову роль у забезпеченні доступу до інформаційних ресурсів.

Разом із тим практика показує, що значна кількість інцидентів інформаційної безпеки пов'язана не з недосконалістю технічних засобів захисту, а з людським фактором. Використання слабких, коротких або передбачуваних паролів, повторне застосування одних і тих самих комбінацій для різних сервісів, зберігання паролів у незахищеному вигляді та ігнорування додаткових механізмів захисту створюють серйозні загрози для конфіденційності даних [1-2]. Особливо поширеною залишається практика використання простих паролів на кшталт «123456», «password» або особистої інформації користувача, що суттєво знижує рівень захищеності облікових записів [3-4].

У зв'язку з цим виникає необхідність комплексного дослідження проблеми надійності паролів та захисту з урахуванням поведінкових особливостей користувачів. Аналіз реальних практик створення та використання паролів, а також рівня обізнаності щодо сучасних методів інформаційної безпеки дозволяє визначити основні вразливості та сформулювати ефективні рекомендації щодо їх усунення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика паролів та автентифікації та методи захисту облікових записів активно досліджується в працях вітчизняних науковців. Автори Баришев Ю. В., Чайкін М. М., Кохан О. В. [1] зазначають, що використання простих, занадто передбачуваних слів та символічних комбінацій негативно впливають на методи паролів та автентифікації. Паралельно було запропоновано ознайомитися з методом генерування паролів, що може перетворювати слово, яке б вони в майбутньому використовували для пароля, на набір символів за допомогою мови програмування Java. В іншій роботі, автором Головкин Д.Ю. [4] розглянуто те, що є певні поширені паролі, які зламуються найлегше, наприклад: «123456», «password», «111111», «sunshine» та інші. Автор пропонує створювати паролі за допомогою декількох способів: використовувати дитяче слово (згадати слово, яке використовували в дитинстві і додати до нього цифри з символами); робити акроніми з фраз (взяти фразу з цитати/вірша, потім взяти лише першу літеру з кожного слова, записати їх латиницею і додати символи з цифрами); вводити випадкові символи (друкувати випадкові символи) та малювати візуальні ключі на клавіатурі (проводити пальцем по літерах та цифрах в певному порядку).

У багатьох роботах зазначається, що, попри технічний прогрес, людський фактор залишається однією з головних причин порушення інформаційної безпеки. Дослідження показують, що користувачі часто обирають паролі, керуючись зручністю запам'ятовування, а не вимогами безпеки. У своїй статті Коцюк Ю. А. [5] зазначає, що відповідно до статистики багато користувачів відчувають дискомфорт при створенні надійного пароля. З одного боку, занадто прості створені паролі використовувати небезпечно, з іншого боку складні паролі дуже важко запам'ятовувати. Автором було створено список типових помилок користувачів серед яких є використання дати народження та типових паролів, таких як «qwerty», «*****» (шість зірочок) тощо. Також авторами Чаплик Т., Гоч П. [6] з'ясовано, що фундаментом для ефективної системи інформаційної безпеки є досвід, компетенції та знання персоналу. Потрібно володіти певним рівнем знань про загрози та деякі принципи безпеки, які визначають ефективність захисту даних користувачів від людського фактора, який наразі є однією з найголовніших причин порушення інформаційної безпеки.

У праці, присвяченій заходам з кібергігієни, зазначається про те, що дуже важливо уникати використання однакових паролів користувачами для різних сервісів [7]. Новохатній Д. Ю. підкреслює те, що надійно створені

паролі є першою лінією захисту від несанкціонованого доступу до облікових записів користувачів. Він рекомендує створювати складні паролі довжиною не менше 12 символів, що містять комбінації великих і малих літер, цифр і спеціальних знаків.

Окремі автори звертають увагу на потребу впровадження двоетапної автентифікації, зважаючи на її високу ефективність у запобіганні зламу. У праці Новохатнього Д. Ю. [7] паралельно звертається увага на двофакторну автентифікацію, яка виконує додатковий рівень захисту паролів, вимагаючи підтвердження особистості користувача під час входу через певний канал, наприклад, за допомогою SMS-коду (одноразового паролю), електронної пошти або спеціального застосунку для автентифікації. Впровадження 2FA підвищує безпеку облікових записів користувачів. Також автори Опірський І., Сікорський Р., Мартинюк Д. [8] вказують на те, що двофакторна автентифікація є засобом забезпечення конфіденційності та цілісності ресурсів у цифровому середовищі. Через велику кількість кіберзагроз і випадків несанкціонованого доступу до облікових записів з'ясовано, що традиційна автентифікація за допомогою пароля вже не може цілком виконувати захисну функцію на належному рівні. Саме тому існує потреба у використанні надійніших засобів автентифікації, проте ефективність двофакторної автентифікації на практиці залежить не лише від технічної реалізації, а й від поведінки самих користувачів.

Також у наукових публікаціях розглядаються методи хешування паролів. В роботі авторів Багрій Р., Бармак О., Манзюк Е. [9] було проведено дослідження схем хешування паролів для підвищення стійкості паролів до різних типів атак. Одним із методів є використання хешування паролів із сіллю, що дозволяє забезпечити більший рівень захисту паролів користувачів, де сіль є випадковим набором символів, який додається до паролю перед його хешуванням. Також у статті висвітлено важливість оновлення та вдосконалення методів хешування та застосування найновіших стандартів безпеки для захисту даних. У роботі автора Тищенко А. А. [10] представлено загальне представлення поняття хешування паролів, яке є одним із найпоширеніших методів зберігання паролів, де паролі перетворюють на випадкові рядки фіксованої довжини за допомогою хеш-функції. Процес хешування є незворотним, неможливо відновити вихідне значення пароля з хешу, що робить його відносно безпечним для зберігання. Втім, атаки методами переборів можуть бути успішними, якщо використовуються слабкі паролі.

Водночас аналіз літературних джерел свідчить про недостатню кількість практичних досліджень, спрямованих на вивчення реальної поведінки користувачів у повсякденному цифровому середовищі. Саме тому поєднання теоретичного аналізу з результатами емпіричного опитування є доцільним та актуальним напрямом дослідження.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є аналіз надійності паролів автентифікації в сучасних інформаційних системах з урахуванням впливу людського фактора, а також визначення рівня обізнаності користувачів щодо основних принципів створення безпечних паролів і використання додаткових механізмів захисту.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено розв'язання таких завдань:

- дослідити принципи функціонування паролів автентифікації;
- проаналізувати типові помилки користувачів при створенні та використанні паролів;
- оцінити рівень використання двоетапної автентифікації та менеджерів паролів;
- узагальнити результати опитування та сформулювати практичні рекомендації щодо підвищення рівня інформаційної безпеки.

Викладення основного матеріалу дослідження

Парольна автентифікація є одним із найпоширеніших механізмів контролю доступу до інформаційних ресурсів [11]. Її популярність зумовлена відносною простотою реалізації, універсальністю та звичністю для користувачів. Пароль виступає секретною інформацією, знання якої підтверджує право користувача на доступ до певної системи або сервісу.

Процес парольної автентифікації передбачає кілька основних етапів. Під час реєстрації користувач створює пароль, який не зберігається у відкритому вигляді, а проходить процедуру криптографічного перетворення – хешування. Хеш-функція перетворює пароль у фіксований набір символів. Під час кожної спроби входу введений пароль хешується, а отримане значення порівнюється зі збереженим набором символів у системі [12].

Надійність пароля визначається сукупністю кількох характеристик, серед яких ключовими є довжина, складність та унікальність. Чим більша довжина пароля, тим більший простір можливих комбінацій, що суттєво підвищує стійкість до атак повного перебору. Використання комбінації великих і малих літер, цифр та спеціальних символів додатково ускладнює процес зламу [7].

Унікальність пароля означає його використання лише для одного сервісу. Повторне застосування одного і того самого пароля значно підвищує ризики, оскільки компрометація одного облікового запису може призвести до втрати доступу до кількох ресурсів одночасно [7]. Саме ця проблема є однією з найпоширеніших у практиці користувачів.

Парольний захист є об'єктом різноманітних атак. Найпоширенішими є атаки повного перебору, при яких система послідовно перевіряє всі можливі комбінації символів [13]. Ефективність таких атак значною мірою залежить від довжини та складності пароля. Не менш поширеними є словникові атаки, які ґрунтуються на використанні баз

даних найпопулярніших паролів [14]. Саме тому комбінації на кшталт «123456», «password» або імен користувачів залишаються вкрай небезпечними.

Людський фактор є одним із ключових аспектів, що впливають на ефективність парольного захисту. Більшість користувачів схильні обирати прості та легко запам'ятовувані паролі, нехтуючи рекомендаціями з безпеки. Це пояснюється як низьким рівнем обізнаності, так і прагненням мінімізувати зусилля під час роботи з інформаційними системами [5].

Одним із найбільш ефективних способів підвищення рівня захисту облікових записів є впровадження двоетапної автентифікації. Цей механізм передбачає використання додаткового фактору підтвердження особи, наприклад одноразового коду, що надсилається на мобільний пристрій або генерується спеціальним застосунком [7-8]. Навіть у разі компрометації пароля наявність другого фактору значно знижує ймовірність несанкціонованого доступу. Однак результати досліджень свідчать про те, що користувачі не завжди активно використовують двоетапну автентифікацію через незручність або недостатнє розуміння її переваг.

Менеджери паролів є програмними засобами, призначеними для безпечного зберігання та генерації складних унікальних паролів [3]. Вони дозволяють зменшити когнітивне навантаження на користувачів і водночас підвищити загальний рівень інформаційної безпеки. Використання таких засобів є одним із рекомендованих підходів у сучасних системах захисту інформації.

Отже, аналіз теоретичних аспектів парольної автентифікації підтверджує, що ефективність захисту значною мірою залежить від поєднання технічних рішень і відповідальної поведінки користувачів. Саме тому доцільним є доповнення теоретичного аналізу практичним дослідженням, спрямованим на оцінку реальних підходів до використання паролів, що буде розглянуто в наступному підрозділі.

Практична частина: аналіз результатів опитування

З метою дослідження реальних практик використання парольної автентифікації та рівня обізнаності користувачів щодо засобів захисту облікових записів було проведено анонімне опитування. Опитування здійснювалося дистанційно за допомогою онлайн-інструментів і не передбачало збору персональних даних або реальних паролів респондентів. У дослідженні взяли участь 28 осіб, серед яких основну частину становили студенти.

Анкетування охоплювало десять запитань, спрямованих на виявлення підходів користувачів до створення та використання паролів, частоти їх зміни, застосування додаткових механізмів захисту, а також рівня обізнаності у сфері інформаційної безпеки. Отримані результати подано у вигляді діаграм, що дозволяє наочно проаналізувати основні тенденції.

Питання та результати опитування:

Питання 1. Частота використання одного пароля

Респондентам було запропоновано оцінити, як часто вони використовують один і той самий пароль для кількох сервісів. Отримані результати подано у вигляді відсоткового співвідношення: 42,9 % – часто, 35,7 % – інколи, 14,3 % – ніколи та 7,1 % відповідно рідко (рис. 1).

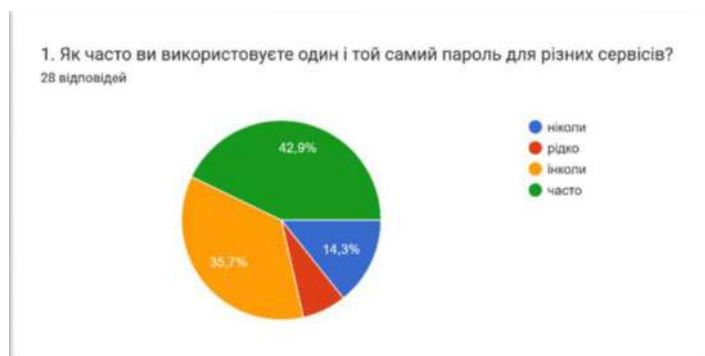


Рис. 1. Розподіл відповідей респондентів щодо використання одного пароля

Аналіз відповідей свідчить, що більшість опитаних часто використовують однакові паролі, що є ризикованою практикою з точки зору кібербезпеки. Для захисту фахівці з кібербезпеки рекомендують використовувати унікальні складні паролі для кожного ресурсу [15].

Питання 2. Середня довжина паролів

Питання було спрямоване на визначення середньої довжини паролів, які використовують респонденти. Варіанти відповідей включали кілька діапазонів довжини паролів. Отримані результати подано у вигляді відсоткового співвідношення: 50 % опитуваних використовують 9–12 символів, 28,6 % використовують 6–8 символів, 17,9 % використовують більше 12 символів і 3,5 % відповідно використовують до 6 символів (рис. 2).

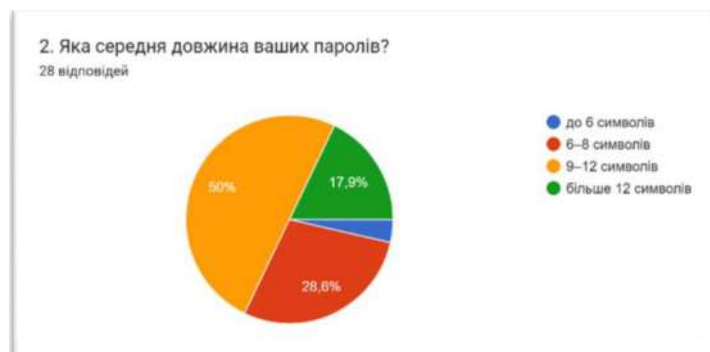


Рис. 2. Середня довжина паролів, що використовуються респондентами

З отриманих даних видно, що більшість опитаних (50 %) використовують паролі довжиною 9–12 символів і 17,9 % опитаних респондентів використовують паролі довжиною більше 12 символів. Довгі паролі надійніші, тому пароль має складатися принаймні з 12–14 символів [7].

Питання 3. Використання різних типів символів у паролях

У межах даного питання було досліджено, які типи символів переважають у паролях користувачів: лише літери, літери з цифрами або комбінація літер, цифр та спеціальних символів. Результати опитування відображено на рисунку: 53,6 % опитаних використовують літери, цифри та спеціальні символи, 32,1 % використовують літери та цифри, 10,7 % лише літери і 3,6 % випадково згенеровані паролі (рис. 3).

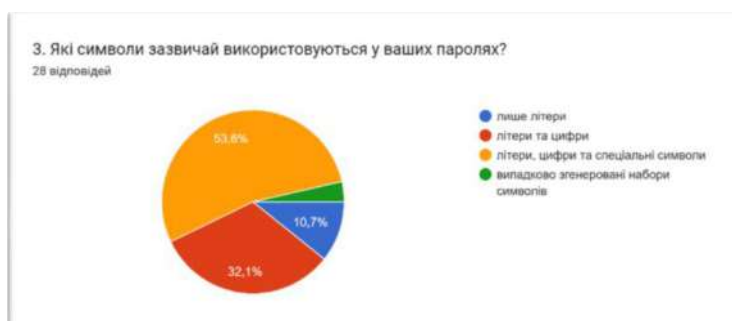


Рис. 3. Типи символів, що використовуються у паролях

Отримані результати демонструють, що більшість опитаних (53,6 %) використовують комбінації літер, цифр та спеціальних символів, що є правильним. Випадкові паролі можуть забезпечувати максимальну складність при мінімальній довжині.

Питання 4. Використання власної інформації у паролях

Метою даного питання було з'ясування, чи використовують респонденти власну інформацію під час створення нового паролю для облікового запису. Отримані результати подано у вигляді відсоткового співвідношення: 46,4 % опитаних не використовують і 32,1 % інколи (рис. 4).

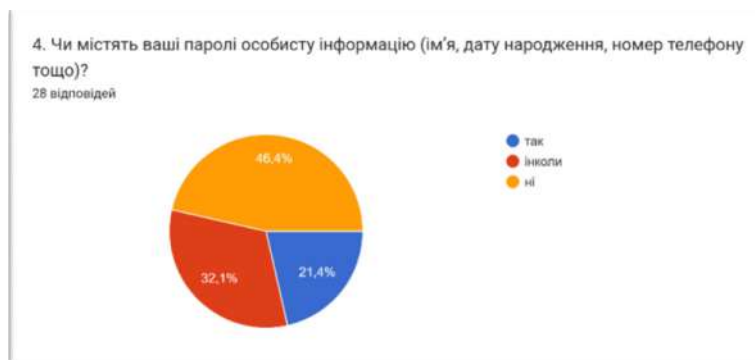
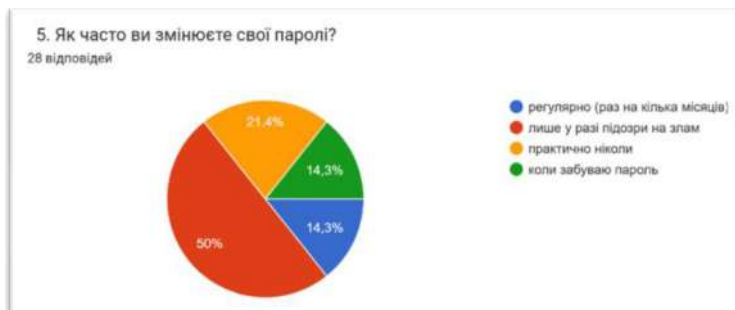


Рис. 4. Використання особистої інформації у паролях

З отриманих даних видно, що більшість опитаних не використовують особисту інформацію для створення паролів, проте певна частка опитаних іноді використовують.

Питання 5. Частота зміни паролю

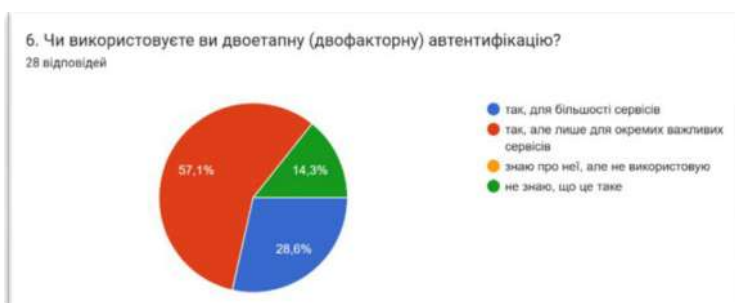
У межах даного питання було досліджено, як часто користувачі змінюють свої паролі: регулярно, лише у разі підозри на злам, практично ніколи і коли забувають пароль. Результати опитування відображено на рисунку: 50 % змінюють лише у разі підозри на злам, 21,4 % практично ніколи, 14,3 % коли забувають пароль і 14,3 % раз на кілька місяців (рис. 5).

**Рис. 5. Аналіз частоти зміни паролю**

Отримані результати демонструють, що більшість опитаних змінюють свої паролі лише у разі підозри на злам, інші 14,3 % змінюють регулярно раз на кілька місяців.

Питання 6. Використання двоетапної (двофакторної) автентифікації

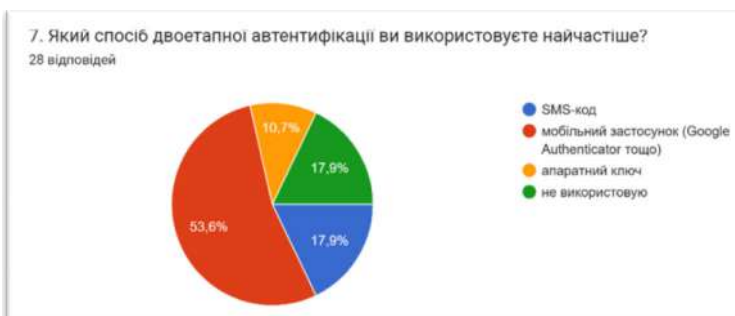
Метою даного питання було з'ясування, чи використовують респонденти двоетапну (двофакторну) автентифікацію для захисту облікового запису: так, ні або взагалі не знають що це. Отримані результати подано у вигляді відсоткового співвідношення (рис. 6).

**Рис. 6. Аналіз використання двоетапної (двофакторної) автентифікації**

З отриманих даних видно, що більшість опитаних (57,1 %) використовують двофакторну автентифікацію для окремих важливих сервісів й інша частка респондентів (28,6 %) використовують для більшості сервісів. 14,3 % опитаних не знають про двофакторну автентифікацію, проте вона потрібна для додаткового захисту облікових записів.

Питання 7. Спосіб двоетапної автентифікації, який використовується

Питання було спрямоване на визначення способів двоетапної автентифікації, які використовують респонденти. Варіанти відповідей включали кілька варіантів: SMS-код; мобільний застосунок; апаратний ключ або не використовують. Отримані результати подано у вигляді відсоткового співвідношення (рис. 7).

**Рис. 7. Способи двоетапної автентифікації, що використовуються респондентами**

З отриманих даних видно, що більшість опитаних використовують мобільний застосунок для двоетапної автентифікації, 17,9 % використовують SMS-код і 10,7 % використовують апаратний ключ.

Питання 8. Хешування паролів

Респондентам було поставлено питання, чи знають вони, що таке хешування паролів із трьома варіантами відповіді: так, розумію принцип; чув(ла), але не знаю що це; не знаю. Отримані результати подано у вигляді відсоткового співвідношення (рис. 8).

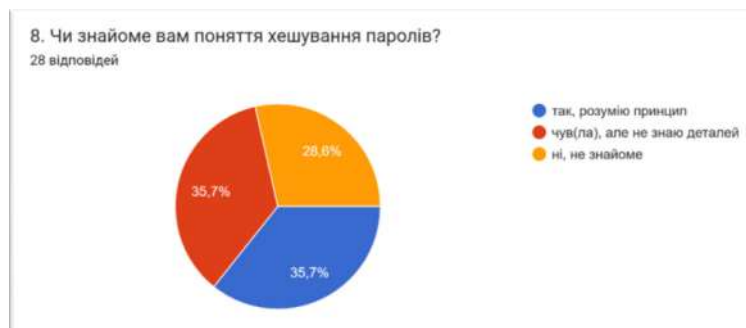


Рис. 8. Аналіз результатів щодо хешування паролів

Аналіз відповідей свідчить, що лише 35,7 % респондентів цілком розуміють що таке хешування паролів. Інші 64,3 % не повною мірою або взагалі не знають, що таке хешування паролів. Прості паролі (наприклад, «123456») мають відомі хеші. Чим складніший пароль, тим важче зловмисникам підібрати його хеш.

Питання 9. Використання менеджерів паролів

Метою даного питання було з'ясування, чи використовують респонденти менеджери паролів для запам'ятовування паролів: так, постійно; пробував(ла), але не використовую; знаю про них, але не довіряю; не знаю, що це. Отримані результати подано у вигляді відсоткового співвідношення (рис. 9).

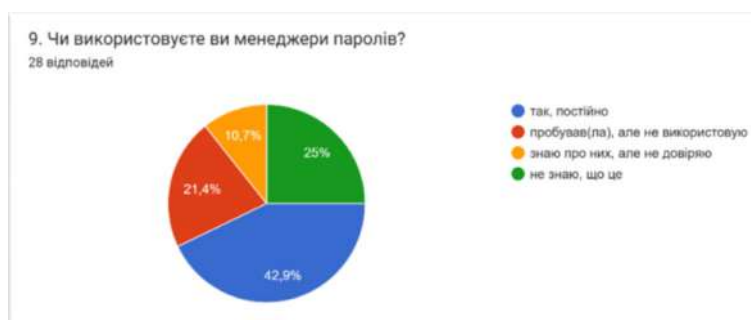


Рис. 9. Використання респондентами

З отриманих даних видно, що більшість (42,9 %) постійно використовують менеджери паролів, інші 21,4 % пробували, але не використовують, і 25 % взагалі не знають про менеджери паролів. Використовувати менеджери паролів дуже зручно, бо не потрібно запам'ятовувати всі свої паролі. Паролі потім при вході на сайт підставляються автоматично, тому користувачам не потрібно вводити їх щоразу під час входу.

Питання 10. Оцінка рівня власної обізнаності у питаннях інформаційної безпеки

Питання було спрямоване на визначення оцінки рівня власної обізнаності у питаннях інформаційної безпеки респондентами. Варіанти відповідей включали кілька варіантів: високий, середній та низький. Отримані результати подано у вигляді відсоткового співвідношення (рис. 10).

З отриманих даних видно, що більшість респондентів (42,9 %) оцінюють свій рівень обізнаності як середній. 39,3 % вважають свій рівень високим. Найменша частка опитаних (17,9 %) має низький рівень обізнаності. Бути обізнаним в питаннях інформаційної безпеки важливо, щоб захистити себе від втрати важливої інформації та перебоїв у роботі.

Таким чином, результати проведеного опитування дозволяють сформулювати комплексне уявлення про сучасні підходи користувачів до паролів автентифікації та створюють підґрунтя для подальшого формулювання практичних рекомендацій щодо підвищення рівня інформаційної безпеки.

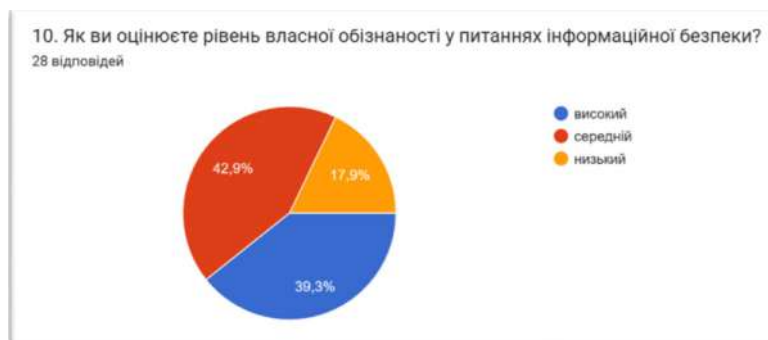


Рис. 10. Рівень обізнаності у питаннях інформаційної безпеки

Висновки

У ході проведеного дослідження було розглянуто проблему надійності паролів автентифікації в сучасних інформаційних системах з урахуванням впливу людського фактора. Встановлено, що, незважаючи на розвиток новітніх технологій захисту інформації, паролі й надалі залишаються основним засобом автентифікації користувачів, а отже, відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки облікових записів та персональних даних.

Аналіз теоретичних аспектів показав, що ефективність паролівого захисту значною мірою залежить від таких характеристик пароля, як довжина, складність та унікальність. Використання коротких і передбачуваних комбінацій символів, а також повторне застосування одного й того самого пароля для різних сервісів істотно підвищує ймовірність несанкціонованого доступу. Окрему увагу було приділено ролі хешування паролів і застосуванню додаткових механізмів захисту, які дозволяють зменшити ризики компрометації навіть у разі витоку даних.

Результати практичної частини дослідження, що ґрунтувалися на анонімному опитуванні користувачів, підтвердили наявність суттєвих проблем у сфері використання паролівого автентифікації. Отримані дані свідчать про те, що значна частина користувачів не дотримується базових рекомендацій з інформаційної безпеки, зокрема використовує повторювані або недостатньо складні паролі, рідко здійснює їх зміну та не завжди застосовує двоетапну автентифікацію. Це вказує на вирішальний вплив людського фактора на загальний рівень захищеності інформаційних систем.

Водночас результати опитування дозволили оцінити рівень обізнаності користувачів щодо сучасних засобів захисту, таких як менеджери паролів і двоетапна автентифікація. Незважаючи на доступність цих інструментів, їх використання залишається недостатньо поширеним, що свідчить про необхідність підвищення рівня цифрової грамотності та формування відповідального ставлення до питань інформаційної безпеки.

Таким чином, проведене дослідження підтверджує актуальність проблеми надійності паролівого захисту та доцільність поєднання технічних рішень із освітніми та організаційними заходами. Отримані результати можуть бути використані в навчальному процесі, а також слугувати підґрунтям для розробки практичних рекомендацій щодо підвищення рівня інформаційної безпеки користувачів у сучасному цифровому середовищі.

Список використаної літератури

1. Барішев Ю. В., Чайкін М. М., Кохан О. В. Метод та засіб підвищення стійкості зрозумілих користувачам текстових паролів. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. 2022. № 2. С. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2022-2-1-8>
2. Габрильчук А. В., Сусукайло В. А., Курій Є. О., Василишин С. І. Дослідження кібератак з використанням машинного навчання на системи управління інформаційною безпекою. Науковий журнал «Комп'ютерні системи та мережі». 2025. Вип. 7, № 1. С. 68 – 78. DOI: <https://doi.org/10.23939/csn2025.01.068>
3. Чуєва А. О. Паролі як критичний фактор уразливості в кібербезпеці. *Free and Open Source Software* : матеріали XVI-ої Міжнародної науково-практичної конференції, 13–14 лютого 2025 р. Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2025. С. 87–89. URL: <https://repository.hneu.edu.ua/bitstream/123456789/35624/3/foss-2025-theses.pdf> (дата звернення: 24.01.2026).
4. Головка Д. Ю. Безпека в цифровому просторі : електронний навчальний курс. Біла Церква : БІНПО ДЗВО «УМО» НАПН України, 2024. 54 с. URL: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/739432/> (дата звернення: 24.01.2026).
5. Коцюк Ю. А. Роль людського чинника у питаннях захисту інформаційних систем. Наукові записки Національного університету «Острозька академія». Серія: Психологія і педагогіка. 2012. Вип. 20. С. 128–138. URL: https://eprints.ua.edu.ua/id/eprint/1419/1/NZ_Vyp_20.pdf#page=128
6. Чаплик Т., Гоч П. Інтеграція інтелектуального капіталу в стратегію інформаційної безпеки підприємств: виклики та перспективи. Дослідження та інновації. 2025. Том 1 № 1 (4). С. 47–54. URL: <https://rni.com.ua/index.php/ri/article/view/47>

7. Новохатній Д. Ю. Виконання заходів з кібергігієни (кібербезпеки) при використанні електронних пристроїв та програмних застосунків. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції* (м. Київ, 2025 р.). Київ : ДУІКТ, 2025. С. 275–278. URL: https://duikt.edu.ua/uploads/p_2779_46212583.pdf.
8. Опірський І., Сікорський Р., Мартинюк Д. Аналіз ефективності двофакторної автентифікації та людського фактора у кібербезпеці. Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка». 2025. Том 4 № 28. С. 413–434. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.28.853>
9. Багрій Р., Бармак О., Манзюк Е. Підвищення стійкості паролів у веб-системах за допомогою вдосконалених схем хешування. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2024, Том 331 № 1. С. 48–51. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-6>
10. Тищенко А. А. Дослідження методів зберігання паролів і надання рекомендацій для підвищення безпеки особистих даних. *Free and Open Source Software: матеріали XV-ої Міжнар. наук.-практ. конф.* (Харків, 13–14 лют. 2024 р.). Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2024. С. 136–138. URL: <https://repository.hneu.edu.ua/bitstream/123456789/31827/3/foss-2024-theses.pdf>
11. Журавель Ю. І., Лісовський Б. В. Аналіз моделей та алгоритмів автентифікації на основі біометричних даних. Сучасний захист інформації. 2025, Вип. 2. С. 51–58. DOI: <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2025.022701>
12. Розломій І.О. Методи підсилення хеш-функції паролю при авторизації користувачів. Вісник Хмельницького національного університету. 2020. № 1. С. 225–229. URL: <https://journals.khnu.km.ua/vestnik/?p=1076>
13. Бондаренко І. О., Скидан Т. М. Атака «BRUTE FORCE» та способи підвищення стійкості шифрів. *Матеріали LIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ* (Вінниця, 20–22 березня 2024 р.). Вінниця : ВНТУ, 2024. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fm/all-fm-2024/paper/view/20656>
14. Товкун Ю. І. Аналіз стійкості паролів з використанням AI-генерованих атак. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2025, Том 2 № 1(92). С. 230–233. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.31>
15. Журавлюк В. В., Барна О. В. Безпека в соціальних мережах: загрози, ризики та способи захисту. *Сучасні цифрові технології та інноваційні методики навчання: досвід, тенденції, перспективи* : матеріали XV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Тернопіль, 10 квітня, 2025 р.). Тернопіль : ТНПУ ім. В. Гнатюка, 2025. С. 202–205. URL: <http://dspace.tnpu.edu.ua/handle/123456789/36143>

References

1. Baryshev Yu. V., Chaikin M. M., Kokhan O. V. (2022) Metod ta zasib pidvyshchennya stiykosti zrozumilykh korystuvacham tekstovykh paroliv [Method and means of increasing the stability of user-understandable text passwords]. *Naukovi pratsi Vinnyts'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu* [Scientific works of Vinnytsia National Technical University] (electronic journal), vol. 2, pp. 1–8. Retrieved from: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2022-2-1-8> [in Ukrainian].
2. Habrylchuk A. V., Susukailo V. A., Kurii E. O., Vasylyshyn S. I. (2025) Doslidzhennya kiberatak z vykorystanniam mashynnoho navchannya na systemy upravlinnya informatsiynoyu bezpekoyu [Analysis of Cyber Attacks Using Machine Learning on the Information Security Management Systems]. *Naukovyy zhurnal "Komp'yuterni systemy ta merezhi"* [Scientific journal "Computer Systems and Networks"] (electronic journal), vol. 7, no. 1, pp. 68–78. Retrieved from: <https://doi.org/10.23939/csn2025.01.068> [in Ukrainian].
3. Chueva A. O. (2025) Paroli yak krytychnyy faktor urazlyvosti v kiberbezpeti [Passwords as a critical vulnerability factor in cybersecurity]. *Proceedings of the XVIth International Scientific and Practical Conference "Free and Open Source Software"* (Ukraine, Kharkiv, February 13–14, 2025), Kharkiv: Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, pp. 87–89. Retrieved from: <https://repository.hneu.edu.ua/bitstream/123456789/35624/3/foss-2025-theses.pdf> [in Ukrainian].
4. Golovko D. Yu. (2024) Bezpeka v tsyfrovomu prostori: elektronnyy navchal'nyy kurs [Security in the digital space: electronic training course]. *Bila Tserkva: BINPO DZVO "UMO"*. Retrieved from: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/739432/> [in Ukrainian].
5. Kotsyuk Y. A. (2012) Rol' lyuds'koho chynnyka u pytannakh zakhystu informatsiynykh system [The role of the human factor in issues of information systems protection]. *Naukovi zapysky Natsional'noho universytetu Ostroz'ka akademiya. Seriya: Psykholohiya i pedahohika* [Scientific notes of the National University of Ostroh Academy. Series: Psychology and Pedagogy] (electronic journal), no. 20, pp. 128–138. Retrieved from: https://eprints.oa.edu.ua/id/eprint/1419/1/NZ_Vyp_20.pdf#page=128 [in Ukrainian].
6. Chaplyk T., Goch P. (2025) Intehratsiya intelektual'noho kapitalu v stratehiyu informatsiynoyi bezpeky pidpryyemstv: vyklyky ta perspektyvy [Integration of intellectual capital into the information security strategy of enterprises: challenges and prospects]. *Doslidzhennya ta innovatsiyi* [Research and Innovations] (electronic journal), vol. 1, no. 4, pp. 47–54. Retrieved from: <https://rmi.com.ua/index.php/ri/article/view/47> [in Ukrainian].

7. Novokhatniy D. Yu. (2025) Vykonannya zakhodiv z kiberhihiyeny (kiberbezpeky) pry vykorystanni elektronnykh prystroyiv ta prohramnykh zastosunkiv [Implementation of cyber hygiene (cyber security) measures when using electronic devices and software applications]. Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference (Ukraine, Kyiv, February 27, 2025), Kyiv: Educational and Scientific Institute of Cybersecurity and Information Protection DUICT, pp. 275–278. Retrieved from: https://duikt.edu.ua/uploads/p_2779_46212583.pdf [in Ukrainian].
8. Opirskyy I., Sikorskyi R., Martyniuk D. (2025) Analiz efektyvnosti dvofaktornoyi avtentyfikatsiyi ta lyuds'koho faktora u kiberbezpeti [Analysis of the effectiveness of two-factor authentication and the human factor in cybersecurity]. Elektronne fakhove naukovye vydannya "Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika" [Electronic Professional Scientific Journal "Cybersecurity: Education, Science, Technique"] (electronic journal), vol. 4, no. 28, pp. 413–434. Retrieved from: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.28.853> [in Ukrainian].
9. Bahrii R., Barmak O., Manziuk E. (2024) Pidvyshchennya stiykosti paroliv u veb-systemakh za dopomohoyu vdoskonalenykh skhem kheshuvannya [Improving the resistance of passwords in web systems using advanced hashing schemes]. Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky [Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences] (electronic journal), vol. 331, no. 1, pp. 48–51. Retrieved from: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-6> [in Ukrainian].
10. Tyshchenko A. A. (2024) Doslidzhennya metodiv zberihannya paroliv i nadannya rekomendatsiy dlya pidvyshchennya bezpeky osobystykh danykh [Research on password storage methods and recommendations for improving personal data security]. Proceedings of the 15th International Scientific and Practical Conference "Free and Open Source Software" (Ukraine, Kharkiv, February 13–14, 2024), Kharkiv: Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, p. 144. Retrieved from: <https://repository.hneu.edu.ua/bitstream/123456789/31827/3/foss-2024-theses.pdf>
11. Zhuravel Y. I., Lisovsky B. V. (2025) Analiz modeley ta alhorytmiv avtentyfikatsiyi na osnovi biometrychnykh danykh [Analysis of authentication models and algorithms based on biometric data]. Suchasnyy zakhyst informatsiyi [Modern information security] (electronic journal), vol. 2, no. 62, pp. 51–58. Retrieved from: <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2025.022701> [in Ukrainian].
12. Rozlomiyy I. O. (2020) Metody pidsylennya khesh-funktsiyi parolyu pry avtoryzatsiyi korystuvachiv [Methods of increasing the password hash function at user authorization]. Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu [Bulletin of Khmelnytsky National University] (electronic journal), vol. 1, no. 281, pp. 225–229. Retrieved from: <https://journals.khnu.km.ua/vestnik/?p=1076> [in Ukrainian].
13. Bondarenko I. O., Skydan T. M. (2024) Ataka "BRUTE FORCE" ta sposoby pidvyshchennya stiykosti shyfriv [«BRUTE FORCE» attack and methods of increasing the stability of ciphers]. Proceedings of the LIII scientific and technical conference of VNTU divisions (Ukraine, Vinnytsia, March 20–22, 2024), Vinnytsia: Vinnytsia National Technical University, pp. ????. Retrieved from: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fm/all-fm-2024/paper/view/20656> [in Ukrainian].
14. Tovkun Yu. I. (2025) Analiz stiykosti paroliv z vykorystanniam AI-henerovanykh atak [Analysis of password resistance to AI-generated attacks]. Visnyk Khersons'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu [Visnyk of Kherson National Technical University] (electronic journal), vol. 2, no. 92, pp. 230–233. Retrieved from: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.31> [in Ukrainian].
15. Zhuravlyuk V. V., Barna O. V. (2025) Bezpeka v sotsial'nykh merezhakh: zahrozy, ryzyky ta sposoby zakhystu [Security in social networks: threats, risks and methods of protection]. Proceedings of the XV International Scientific and Practical Internet Conference (Ukraine, Ternopil, April 10, 2025), Ternopil: Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, pp. 202–205. Retrieved from: <http://dspace.tnpu.edu.ua/handle/123456789/36143> [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 20.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

О. В. КУЗЬМЕНКО

аспірант кафедри штучного інтелекту, моделювання та статистики
Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана
ORCID: 0009-0002-1271-9293

АНАЛІЗ ТА ПОРІВНЯННЯ ДЕЯКИХ МОДЕЛЕЙ DATA SCIENCE В КОНТЕКСТІ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ МАКРОЕКОНОМІЧНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ

Проведено огляд деяких моделей Data Science, які можуть бути використані для сучасного макроекономічного прогнозування. У статті здійснено огляд і практичне порівняння сучасних моделей Data Science, які можуть бути використані для макроекономічного прогнозування в умовах зростаючої нестабільності та структурних змін економіки. Основну увагу приділено аналізу можливостей поєднання класичних економетричних підходів із методами машинного навчання з метою підвищення точності прогнозів макроекономічних показників. Для емпіричного дослідження використано реальний часовий ряд номінального валового внутрішнього продукту, сформований на основі квартальних статистичних даних.

У межах дослідження побудовано та проаналізовано три прогнозні моделі: класичну авторегресійну інтегровану модель ковзного середнього (ARIMA), ансамблеву модель градієнтного бустингу (Gradient Boosting Regressor, GBR) та багатошарову перцептронну нейронну мережу (Multilayer Perceptron, MLP). Вихідну вибірку поділено на навчальну та тестову частини, що дало змогу об'єктивно оцінити якість прогнозування поза межами навчальних даних. Для порівняльного аналізу результатів застосовано стандартні показники точності прогнозу – середньоквадратичну помилку (RMSE) та середню абсолютну помилку (MAE).

Окрему увагу приділено дослідженню бустингових підходів як інструменту підвищення прогностичної здатності класичних часових моделей. Зокрема, розглянуто можливість покращення результатів ARIMA шляхом інтеграції з методами машинного навчання. На основі отриманих результатів визначено найбільш перспективний тип і специфікацію моделі, яка демонструє кращу точність прогнозу порівняно з традиційними економетричними підходами та має значний потенціал для подальшого вдосконалення.

Практична цінність дослідження полягає у формуванні методологічної основи для застосування інструментів Data Science в макроекономічному аналізі та прогнозуванні, що є особливо актуальним у контексті стратегічного планування та економічного відновлення України в середньо- та довгостроковій перспективі.

Ключові слова: макроекономічне прогнозування, Data Science, машинне навчання, часові ряди, ARIMA, градієнтний бустинг, нейронні мережі, валовий внутрішній продукт.

O. V. KUZMENKO

Postgraduate Student at the Department of Artificial Intelligence,
Modeling and Statistics
Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman
ORCID: 0009-0002-1271-9293

ANALYSIS AND COMPARISON OF SELECTED DATA SCIENCE MODELS IN THE CONTEXT OF THEIR APPLICATION TO MACROECONOMIC FORECASTING

This article presents a review and practical comparison of selected Data Science models that can be applied to modern macroeconomic forecasting. The study focuses on the use of these models under conditions of increasing economic instability and structural changes. Particular attention is paid to analyzing the potential for combining classical econometric approaches with machine learning methods in order to improve the accuracy of macroeconomic forecasts. The empirical analysis is based on a real time series of nominal gross domestic product constructed using quarterly statistical data.

Within the framework of the study, three forecasting models were developed and analyzed: the classical Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) model, the ensemble Gradient Boosting Regressor (GBR), and the Multilayer Perceptron (MLP) neural network. The original dataset was divided into training and test samples, which allowed for an objective evaluation of forecasting performance on out-of-sample data. Standard forecast accuracy measures, including Root Mean Squared Error (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE), were used for comparative analysis of the results.

Special attention is given to the investigation of boosting approaches as tools for enhancing the predictive capabilities of classical time series models. In particular, the potential for improving ARIMA-based forecasts through integration with machine learning techniques is examined. Based on the obtained results, the most promising model type and specification were identified, demonstrating higher forecasting accuracy compared to traditional econometric approaches and significant potential for further improvement.



© О. В. Кузьменко, 2026

Стаття поширюється на умовах відкритої ліцензії CC BY 4.0

The practical significance of the study lies in the development of a methodological framework for applying Data Science tools in macroeconomic analysis and forecasting. This is especially relevant in the context of strategic planning and the economic recovery of Ukraine in the medium- and long-term perspective.

Key words: macroeconomic forecasting, Data Science, machine learning, time series, ARIMA, gradient boosting, neural networks, gross domestic product.

Постановка проблеми

У сучасному нестабільному економічному середовищі важливо знати траєкторію економічного зростання (спаду) національної економіки, адже саме вона визначає подальшу якість та рівень життя абсолютно всіх економічних агентів. Саме тому макроекономічний прогноз є важливим, проте водночас і складним явищем, адже врахувати всі детермінанти, які впливатимуть на значення того чи іншого макроекономічного показника, часом просто неможливо.

Дуже часто макроекономічне прогнозування зводиться до звичайного економетричного моделювання та подальшого прогнозування на основі побудованої регресійної (авторегресійної) моделі. Проте в епоху накопичення великої кількості різноманітних даних, бурхливого розвитку систем штучного інтелекту, змінюються також і підходи до прогнозування макроекономічних показників. Це дослідників повертає до важливої проблеми отримання більш якісного прогнозу на основі моделей, які нам пропонує сучасна наука про дані (Data Science).

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідники активно аналізують різні методи та підходи до макроекономічного прогнозування та шукають шляхи покращення макроекономічних прогнозів саме в контексті розвитку моделей машинного навчання.

Результати досліджень, проведених вітчизняними та зарубіжними науковцями, вказують на те, що пошуки ідеального ансамблю моделей для прогнозування макроекономічних показників ще тривають (хоча вибір найкращої моделі можна здійснити лише шляхом тестування на конкретних часових рядах). В контексті розвитку систем штучного інтелекту та різноманітних ШІ-агентів, моделі прогнозування взагалі виходять на новий рівень свого розвитку.

Аламінос Д., Белен-Салас М. та Фернандес-Гамес М. [1] вивчали у своїх дослідженнях як методи глибокого машинного навчання можуть покращити прогноз зростання ВВП та як це допомагає досягнути макроекономічної стабільності в найближчій перспективі.

Куломб Ф., Леру М. та Стеванович Д. показали у своїй праці [2] як мінімізується помилка прогнозу, якщо використовувати саме методи машинного навчання для прогнозу економічного розвитку порівняно зі стандартними макроеконометричними методами.

Каррієро А., Петтенуццо Д., Шекхар Ш. дослідили макроекономічне прогнозування саме за допомогою великих LLM-моделей, яке дає змогу автоматизувати процес та звести вплив суб'єктивних оцінок дослідників до мінімуму. Автори провели ретельну оцінку LLM у порівнянні з традиційними методами макропрогнозування, використовуючи як основу базу даних FRED-MD. У цій роботі подано своєрідний SWOT-аналіз LLM та вивчено їх можливості у прогнозуванні на основі макроекономічних часових рядів.

Репіна І. М. у своїй публікації [4] дослідила прогнозування впливу технологічної сингулярності на розвиток складних соціально-економічних систем. У роботі було зазначено, що соціально-економічне прогнозування потребує використання інтелектуально-аналітичних методів, які об'єднують системний аналіз, машинне навчання (зокрема методи Data Science), теорію складних мереж і методи еволюційного моделювання.

Скрипченко М.І. у монографії [5] досліджує економічну динаміку в постковідну епоху переважно методами класичного регресійного моделювання, але акцентує увагу на моделях і методах Data Science, як таких, які є більш точними та можуть знайти приховані залежності та патерни в макроекономічних часових рядах.

Існує також багато інших наукових праць, які пов'язані з макроекономічним прогнозуванням, але вони базуються переважно на класичних регресійних моделях різного типу, а також адаптивних методах і моделях згладжування часових рядів, які були розроблені в минулому столітті (звичайна багатофакторна лінійна регресія, ARIMA/SARIMA, моделі Хольта та Хольта-Вінтерса, Брауна і т.д.). Отже, моделям макроекономічного прогнозування в епоху бурхливого розвитку моделей і методів Data Science приділяється недостатньо уваги, а тому дана тема дослідження буде надзвичайно актуальною в найближчі роки.

Прогнозування макроекономічного розвитку є важливим інструментом державного управління, оскільки забезпечує інформаційну основу для ухвалення стратегічних і тактичних рішень. Воно дозволяє заздалегідь оцінити можливі наслідки економічної політики, звузити коло альтернативних сценаріїв розвитку та підвищити обґрунтованість управлінських рішень. Крім того, результати прогнозів слугують базою для подальшої оцінки ефективності реалізованих заходів, що визначає центральну роль макроекономічного прогнозування у системі моніторингу економічних процесів [6].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є: огляд сучасних методів Data Science, які можуть бути використані для прогнозування економічного зростання України та дати більше можливостей для отримання якісніших макроекономічних прогнозів,

ніж ті, які були отримані за допомогою класичних економетричних моделей. Також важливо довести або спростувати гіпотезу про те, що методи та моделі Data Science більш ефективні за класичні.

Викладення основного матеріалу дослідження

Класичні економетричні моделі, попри їх придатність для короткострокового прогнозування, мають низку суттєвих обмежень, які необхідно враховувати при аналізі часових рядів макроекономічних показників, зокрема:

- обмеженість обсягу статистичних даних (наприклад, для України часто доступно лише близько 35 річних спостережень);
- виникнення мультиколінеарності, гетероскедастичності та автокореляції залишків у багатофакторних моделях;
- наявність пропусків у даних та складність їх коректної імпутації;
- неструктурований характер частини інформації та помилки форматування;
- неможливість безпосереднього включення текстових і графічних даних до класичних економетричних моделей.

Водночас використання економетричних моделей залишається виправданим, оскільки вони й надалі є потужним інструментом аналізу макроекономічних процесів і фінансових ринків. Застосування статистичних методів дозволяє досліджувати взаємозв'язки між економічними показниками та використовувати отримані закономірності для прогнозування розвитку національної економіки [6].

Подолати частину зазначених обмежень дозволяє застосування методів Data Science. Використання алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту сприяє підвищенню точності й надійності прогнозування макроекономічних показників України порівняно з класичними підходами.

За визначенням U.S. Census Bureau, Data Science – це галузь, що застосовує наукові методи, інструменти та алгоритми для отримання знань і формування аналітичних висновків на основі великих та різномірних масивів даних. Вона має міждисциплінарний характер, поєднуючи статистику, інформатику, математику та галузеву експертизу, що забезпечує її широку прикладну цінність у сфері макроекономічного прогнозування. Сучасні моделі штучного інтелекту суттєво змінюють парадигму прогнозування, яка домінувала ще 20–30 років тому, спрощуючи та водночас поглиблюючи аналітичний процес [7].

Сучасні алгоритми здатні виявляти приховані закономірності та нелінійні взаємозв'язки у великих обсягах економічної інформації. Інтеграція методів машинного навчання, нейронних мереж та ансамблевих моделей дозволяє більш адекватно враховувати структурні зрушення, спричинені пандемією COVID-19 та повномасштабною війною, формуючи адаптивні прогнози, корисні для органів державного управління, бізнесу та інвесторів.

Для побудови моделей макроекономічного прогнозування доцільно використовувати такі алгоритми машинного навчання:

- логістичну регресію як базову інтерпретовану модель;
- дерева рішень (Decision Trees) для виділення ключових факторів впливу;
- ансамблеві методи – Random Forest, градієнтний бустинг (XGBoost, LightGBM, CatBoost);
- метод опорних векторів (SVM) для роботи з невеликими вибірками та нелінійними залежностями;
- регресійні та авторегресійні моделі навчання на основі даних часових рядів (лінійна регресія, ARIMA/SARIMA, VAR-моделі тощо), які часто є базисом для певних алгоритмів машинного навчання, але більше належать до класичних моделей прогнозування;
- нейронні мережі (MLP, LSTM, GRU) для моделювання складних нелінійних процесів;
- згорткові нейронні мережі (наприклад, CNN) для прогнозування на основі графічних даних, зокрема економічних візуалізацій [8].

Порівняння ефективності моделей доцільно здійснювати з використанням ключових метрик якості прогнозу: MAE, MAPE, RMSE, а також показників чутливості та специфічності. Часто додатково передбачається застосування крос-валідації та тестування на інших часових інтервалах для перевірки стійкості результатів.

Основним «матеріалом» для будь-якого виду макроекономічного прогнозу є первинні дані, які будуються, як правило, на основі часових рядів макроекономічних показників (агрегованих та неагрегованих). До агрегованих макроекономічних показників належать валовий внутрішній продукт (ВВП), національний дохід, грошові агрегати (M1–M4) та інші показники, які зазвичай представлені в системі національних рахунків. До простих макроекономічних показників відносять ті, що є основою для формування агрегованих величин. Кожен із зазначених показників має власні особливості динаміки та структури, що ускладнює процес прогнозування.

У рамках даного дослідження було побудовано три різних моделі (ARIMA, MLP і GBR) в середовищі Python за допомогою Jupyter Notebook для показника номінального ВВП (табл.1). Для дослідження було взято часовий ряд, який складається із 59 точок (дані за 4-й квартал 2025 року на момент написання статті ще не були опубліковані).

Для всіх трьох моделей вибірка розбивалася на train і test-складові, тобто тренувальну і тестову. На тренувальній вибірці (2013–2022 роки) моделі навчалися, а на тестових кварталах (2023–2025 рр.) здійснювали прогноз.

Таблиця 1

Вихідні дані для побудови моделей

Рік та квартал	Номінальний ВВП, млн.грн.
2011Q1	261 878
2011Q2	314 620
2011Q3	376 019
2011Q4	364 083
2012Q1	293 493
2012Q2	349 212
2012Q3	387 620
2012Q4	378 564
2013Q1	302 864
...	...
2025Q1	1 923 124
2025Q2	2 021 451
2025Q3	2 427 964

Джерело: складено автором на основі [9]

Коротко опишемо кожну з цих моделей та обґрунтуємо наш вибір.

ARIMA – це класична статистична модель для прогнозування часових рядів, що сформована на основі методології Бокса і Дженкінса, яка поєднує три компоненти:

1. AR (autoregressive) – авторегресія, тобто модель використовує залежність поточного значення від попередніх значень ряду.

2. I (integrated) – інтегрування, тобто використовується для перетворення ряду в стаціонарний (видалення тренду/тенденції).

3. MA (moving average) – це ковзне середнє, тобто береться середнє значення кількох значень із переміщенням вниз. В результаті часовий ряд згладжується, а модель враховує вплив випадкових шумів із попередніх спостережень.

В нашому випадку використано параметри ARIMA(1,1,1), оскільки застосовувалася авторегресія, один рівень інтегрування та одне ковзне середнє. Як правило, така комбінація коефіцієнтів дає найкращі результати на макроекономічних часових рядах. Перевагою даної моделі є те, що вона добре враховує лінійний тренд та підходить для обмеженої кількості даних, проте не враховує сезонну компоненту та нелінійні залежності, а згладжування може бути дещо надмірним.

MLP (Multilayer Perceptron) – це нейронна мережа, яка може непогано бачити нелінійні залежності в часових даних на відміну від класичних регресійних моделей. Для побудови моделі було використано різні параметри, проте дана перцептронна модель погано працює на обмежених вибірках (до 100 точок). Тому вона була побудована лише для того, щоб показати недоліки нейромереж даного типу, якщо їх застосовувати на часових даних.

Були використані наступні параметри, які підібрані саме з врахуванням часових даних:

1) hidden_layer_sizes=(100,50). Це означає, що модель має два прихованих шари з 100 і 50 нейронів.

2) activation='relu', означає, що було застосовано саме нелінійну функція активації.

3) solver='adam', означає, що використали алгоритм оптимізації градієнтного спуску.

В якості ознак нами було використано: попередні 8 кварталів ВВП (look_back=8), номер кварталу, темп росту попереднього кварталу, середнє значення останніх 4 кварталів. Прогноз базується на тому, що кожне передбачене значення використовувалося як новий лаг для наступного прогнозу.

Дана нейромережева модель може моделювати складні, нелінійні взаємозв'язки, але потенційно корисна для обробки даних з шумом та різкими коливаннями і як вже зазначалось, погано працює на малих обсягах даних (у нас вибірка для 56 кварталів).

Gradient Boosting Regressor (GBR) – це бустингова гібридна ансамблева модель, яка будує дерева рішень послідовно, і кожне наступне дерево навчається на залишках помилок попередніх дерев. Наша модель була побудована з такими параметрами: n_estimators=1000, learning_rate=0.03, max_depth=3, look_back=8 кварталів, тому побудована GBR-модель по суті бачить цілий рік даних.

Ознаки моделі наступні: враховані лаги 8 попередніх кварталів, номер кварталу (1–4), темп росту попереднього кварталу, середнє значення останніх 4 кварталів.

Найголовнішим уточненням є те, що модель побудована на першому варіанті ARIMA, який описано вище, оскільки саме залишки ARIMA на train допомагають GBR компенсувати недоліки ARIMA. Тому кожен прогноз стає новим лагом для наступного кварталу, а залишок ARIMA для майбутнього тесту ставимо 0.

Так як дана модель бустингова і лише підсилює ARIMA-модель, а також враховує як тренд, так і локальні коливання, то вона показала кращі результати (табл. 2). Крім того, дана модель робить точні прогнози на обмеженому

наборі даних та може використовувати додаткові ознаки, що підвищує точність моделі. У табл. 2 порівняємо похибки прогнозу, які отримали на тестовій вибірці.

Таблиця 2

Порівняння моделей на тесті (2023–2025 квартали)

Модель	MAE (млн.грн)	RMSE (млн.грн)	Опис результату
ARIMA	434 231	511 341	Базовий тренд, середня точність
MLP	662 252	756 530	Найгірша модель (через малий обсяг даних)
GBR	329 871	400 354	Найкраща модель, враховує тренд і локальні коливання

Джерело: розраховано автором

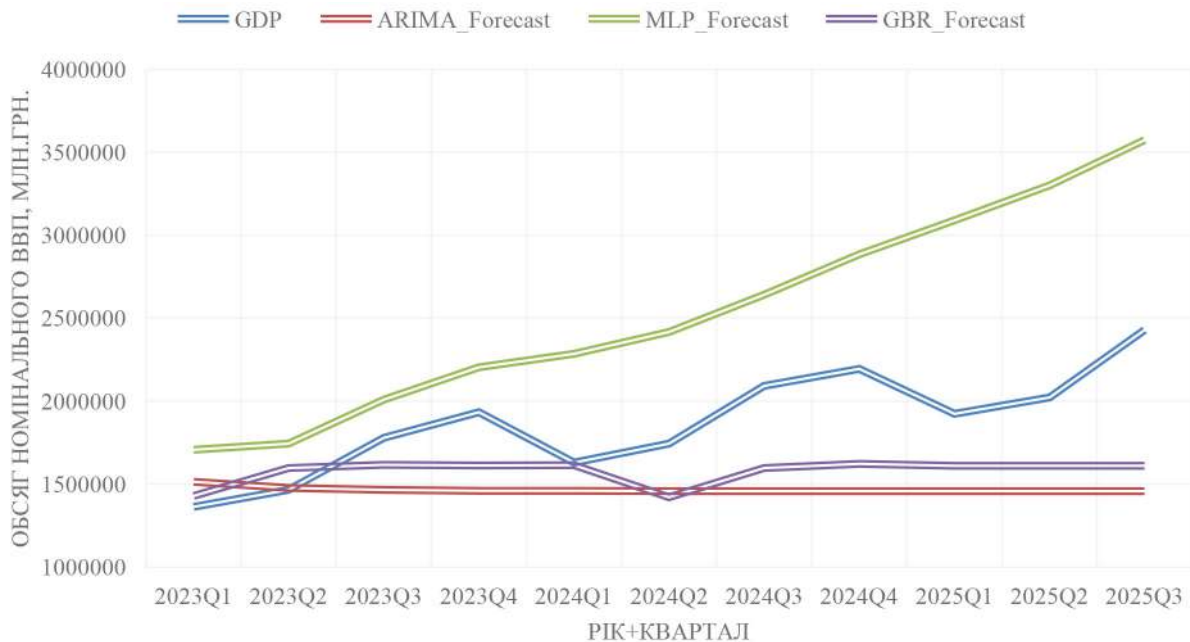


Рис. 1. Порівняння прогнозної точності моделей ARIMA, MLP і GBR

Джерело: побудовано автором

Таким чином, прогнозний графік моделі GBR найменше відхиляється від графіка реальних даних. Цю GBR-модель можна брати за основу для подальших досліджень та далі її покращувати.

Висновки

Отже, згідно з результатами оцінювання прогнозної точності на тестових кварталах вибірки (2023–2025 рр.), модель Gradient Boosting Regressor продемонструвала найменші значення середньої абсолютної похибки (MAE) та середньоквадратичної похибки (RMSE) у порівнянні з ARIMA та багатошаровою нейронною мережею (MLP). Це свідчить про вищу здатність ансамблевих методів машинного навчання враховувати нелінійні залежності та сезонні коливання у динаміці номінального ВВП.

В умовах сучасних глобальних і внутрішніх викликів макроекономічне прогнозування потребує відходу від виключно класичних економетричних підходів та переходу до комплексного використання інструментів Data Science, здатних доповнити й удосконалити традиційні методи аналізу. Інтеграція методів машинного навчання, нейронних мереж і аналізу великих даних дає змогу підвищити точність прогнозів, урахувати нелінійні залежності та структурні зрушення в економіці. Застосування таких підходів формує надійну аналітичну базу для стратегічного планування та може стати одним із ключових чинників ефективного економічного відновлення України в повоєнний період.

Список використаної літератури

- Alaminos, D., Salas, M.B. & Fernández-Gámez, M.A. Quantum Computing and Deep Learning Methods for GDP Growth Forecasting. *Comput Econ* 59, 803–829 (2022). URL: <https://doi.org/10.1007/s10614-021-10110-z>
- Goulet Coulombe, P., Leroux, M., Stevanovic, D., & Surprenant, S. (2022). How is machine learning useful for macroeconomic forecasting? *Journal of Applied Econometrics*, 37(5), 920-964. URL: <https://doi.org/10.1002/jae.2910>
- Carriero, A., Pettenuzzo, D., & Shekhar, S. (2024). Macroeconomic forecasting with large language models. *arXiv preprint*. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.00890>

4. Рєпіна І. М. Прогнозування впливу технологічної сингулярності на розвиток складних соціально-економічних систем. Матеріали конференції. Хмельницький : ХМНУ, 2025. С. 289. URL: <https://elar.khmn.edu.ua/server/api/core/bitstreams/c2cc4f73-a226-4df9-b831-fbed5d3b71e5/content#page=289>
5. Скрипниченко М. І. Методи і моделі оцінювання економічної динаміки в системі координат постковідних реалій та війни в Україні. Траєкторії розвитку повоєнної економіки України в системі координат постпандемічного світу: колективна монографія. НАН України, ДУ «Інститут економіки та прогнозування НАН України». – Київ : [б. в.], 2023. – Розділ 1. – С. 11–29.
6. Бикова А. Л., Галєєв, О. С. (2024) «Теоретичні аспекти макроекономічного прогнозування: вітчизняний досвід», Економіка та суспільство, (62). URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/3947/3870>
7. What Is Data Science? Definition, Skills, Applications & More. Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences. URL: <https://seas.harvard.edu/news/what-data-science-definition-skills-applications-more>
8. Witten I. H., Frank E., Hall M. A. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques. 4th ed. Burlington : Morgan Kaufmann, 2016. 654 p.
9. Міністерство фінансів України. Валовий внутрішній продукт (ВВП) номінальний: квартальні дані [Електронний ресурс]. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/economy/gdp/>

References

1. Alaminos, D., Salas, M. B., & Fernández-Gámez, M. A. (2022). Quantum computing and deep learning methods for GDP growth forecasting. *Computational Economics*, vol. 59, pp. 803–829. <https://doi.org/10.1007/s10614-021-10110-z>
2. Goulet Coulombe, P., Leroux, M., Stevanovic, D., & Surprenant, S. (2022). How is machine learning useful for macroeconomic forecasting? *Journal of Applied Econometrics*, vol. 37, no. 5, pp. 920–964. <https://doi.org/10.1002/jae.2910>
3. Carriero, A., Pettenuzzo, D., & Shekhar, S. (2024). *Macroeconomic forecasting with large language models*. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.00890>
4. Rieпина, I. M. (2025). Prohnozuvannia vplyvu tekhnolohichnoi synhuliarnosti na rozvytok skladnykh sotsialno-ekonomichnykh system [Forecasting the impact of technological singularity on the development of complex socio-economic systems]. *Proceedings of the Conference*, p. 289. Khmelnytskyi : Khmelnytskyi National University. <https://elar.khmn.edu.ua/server/api/core/bitstreams/c2cc4f73-a226-4df9-b831-fbed5d3b71e5/content#page=289> [in Ukrainian].
5. Skrypnichenko, M. I. (2023). Metody i modeli otsiniuvannia ekonomichnoi dynamiky v systemi koordynat postkovidnykh reali ta viiny v Ukraini [Methods and models for assessing economic dynamics in the coordinate system of post-COVID realities and the war in Ukraine]. In *Traiektorii rozvytku povoiennoi ekonomiky Ukrainy v systemi koordynat postpandemichnoho svitu* (Chapter 1, pp. 11–29). Kyiv: Institute for Economics and Forecasting of NAS of Ukraine. [in Ukrainian].
6. Bykova, A. L., & Halieiev, O. S. (2024). Teoretychni aspekty makroekonomichnoho prohnozuvannia: vitchyzniani dosvid [Theoretical aspects of macroeconomic forecasting: domestic experience]. *Ekonomika ta suspilstvo*, no. 62. <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/3947/3870> [in Ukrainian].
7. Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences. (n.d.). *What is data science? Definition, skills, applications & more*. <https://seas.harvard.edu/news/what-data-science-definition-skills-applications-more>
8. Witten, I. H., Frank, E., & Hall, M. A. (2016). *Data mining: Practical machine learning tools and techniques* (4th ed.). Burlington: Morgan Kaufmann.
9. Ministry of Finance of Ukraine. (n.d.). Valovyi vnutrishnii produkt (VVP) nominalnyi: kvartalnyi dani [Gross domestic product (GDP), nominal: quarterly data]. <https://index.minfin.com.ua/ua/economy/gdp/> [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 12.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

В. А. ЛАБЧУК

аспірант кафедри програмних засобів і технологій

Херсонський національний технічний університет

ORCID: 0009-0006-9252-761X

SMALL DATA ЯК ПЕРСОНАЛІЗОВАНЕ РІШЕННЯ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ СТРАТЕГІЇ КОРЕКЦІЇ ВАГИ ЛЮДИНИ

У статті розглянуто сутність роботи з даними, які на перший погляд здаються універсальними, однак такими не є. Навіть попри можливість зведення розв'язуваних задач до декількох типів, їх класифікації та алгоритмізації, й успішного застосування *big data*, на практиці універсальні рішення будь-яких задач не завжди є доцільними та придатними до масового тиражування, навіть якщо здається що проблема виглядає однаково для всіх людей чи групи. Спричиняти таку поведінку можуть взаємозалежності між атрибутами та групами атрибутів даних, а також наявність контексту, що може не враховуватися у випадку використання великих даних. Тож у статті розглянуто доцільність застосування *small data* на прикладі персональної боротьби з ожирінням та вплив різних атрибутів, досліджених емпірично, на загальний результат. Завдання корекції ваги – це саме той приклад, де загальні рішення можуть призводити не лише до різного ефекту у схожих людей, але навіть до різного результату в 1-єї людини в різні часові проміжки життя.

Для застосування концепції *small data* для такої прикладної задачі, доцільне застосування методів багатокритеріального аналізу, зокрема TOPSIS для вибору найбільш близького до ідеального рішення при ранжуванні за багатьма критеріями одночасно, різних методів аналізу ієрархій для порівняння альтернатив (в даному випадку різних стратегій корекції ваги для однієї людини) за кількома критеріями. Доцільні й методи кореляційного аналізу з метою виявлення зв'язків між різними атрибутами (наприклад, видом тренування, його здатністю до витрат калорій, рівнем та бажанням споживання їжі після нього, а також мотивацією займатися саме цим тренуванням конкретній людини), та регресійного аналізу, а також інтелектуальний аналіз даних.

Науковою новизною є дослідження ситуації на прикладі реальних емпіричних даних та взаємозв'язку між ними.

Ключові слова: *small data*, обробка даних, персоналізована система, медичні дані, складна динамічна система, розмір та розмірність вибірки, контекст даних, правдивість даних.

V. A. LABCHUK

Postgraduate Student at the Department of Software Tools and Technologies

Kherson National Technical University

ORCID: 0009-0006-9252-761X

SMALL DATA AS A PERSONALIZED SOLUTION FOR FORMATION OF THE STRATEGY OF THE PERSON'S WEIGHT CORRECTION

The article shows the handling with so-called universal data and problems during this, but which isn't universal in real due to some hidden patterns between some attributes. Even when algorithmization and classification of tasks for only several big branches are possible and Big data exists – even now it's not the best idea to always use universal methods for dealing with all problems. Such behavior can look strange a little but can be caused by coupling between some of attributes in the multiattributes samples of a data. And even more – context exists as well but big data doesn't always very good to deal with it. So the aim of the article is to find some problem which shows this principle brightly and one of them is the task of normalizing the human's weight. This problem is insidious due to causing not only the different effect during the same actions in quite similar people, but even between the different version of one people in different time periods.

For using the conception of small data for so applied tasks, it will be useful to use some methods like multicriteria analysis, f.e. TOPSIS to deal with the most close to ideal solution while choosing between many criterias simultaneously. Different methods for ierarchy analysis as well so we can compare the alternatives (it's about different strategies of weight's correction for the same person). Also the methods of correlation analysis will be useful due to allowing to establish connection between different attributes from the multiattributes data samples (f.e. between type of sport activity, amount of possible kkal for burn, amount of desire to eat after that, and motivation to exercise with the help of this sport for concrete person in general).

Scientific innovation here is in researchement of situation with the help of real empiric data from real world and finding out the impact on the person.

Key words: *small data*, data processing, personalized system, medical data, complex dynamic system, size and dimension of the sample, data context, data veracity.



© В. А. Лабчук, 2026

Стаття поширюється на умовах відкритої ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми

Існує проблема боротьби з проблемами, які потребують високоперсоналізованих рішень, навіть якщо здаються такими, які можуть обійтися без таких. Одним зі способів забезпечення цього є парадигма small data та розгляд об'єкту і предмету дослідження як складної динамічної системи. Іншою проблемою є виявлення залежності результату від конкретних емпіричних даних на практиці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідженням проблеми вирішення завдань за допомогою small data, які на перший погляд здаються загальними, однак такими не є, і відповідно потребують персоналізованих рішень, займалися науковці такі як Eric B. Hekler, P. Klasnja, G. Chevanec, N. M. Golaszewski, D. Lewis, I. Sim. Шаховська Н.Б. займалася дослідженням питань якості даних і класифікацією невизначеностей, боротьбою з кожним видом з них. Святний В. А. досліджував складні динамічні системи, прикладом якої може бути персоналізована система слідування за вагою пацієнта, а Шерстюк В.Г. досліджував вплив розміру та розмірності вибірок на можливість аналізу даних.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є аналіз показників та їх взаємозалежності між собою з метою формування оптимальної динамічної стратегії корекції ваги людини на кожному етапі, зокрема на етапі значного відхилення від комфортної маси, незначного відхилення, в умовах значних коливань ваги або ж на етапі повторної корекції маси тіла. Для цього дослідження має проаналізувати основні фактори впливу на вагу, можливість різної поведінки в разі схожих дій але для різних людей, а також можливість різної поведінки навіть для однієї людини однак в різні періоди часу.

Викладення основного матеріалу дослідження

Проблеми в будь-якій сфері характеризуються або здатністю бути вирішеними загальними універсальними методами, або ж здатністю потребувати комплексних і специфічних саме для конкретної ситуації рішень. Для першого випадку існує автоматизація, другий же випадок складніший. Більше того, проблема може здаватися вирішуваною загальними методами і засобами на перший погляд, однак такою не бути. Зазвичай це ті явища, з якими часто стикаються в житті, однак які мають таку велику кількість атрибутів, що встановити чітку залежність результату від зміни того чи іншого параметру не вдається або ж дуже важко. Одним з таких явищ є питання нестандартної ваги людей, зокрема ожиріння. На перший погляд, це загальна проблема, з якою стикаються мільйони людей. І рецепт вирішення проблеми теж на початку здається простий і універсальний – потрібно лише щоб витрата калорій була більшою, ніж споживання. Але атрибутів настільки багато, що загальні рішення можуть не підходити [1]. А до атрибутів можна віднести:

1. Ступінь зайвої ваги – надмірна чи дорівнює «пару зайвих кілограм». При надмірній масі є з чого зменшувати і можливі зменшення по багато кг/міс, однак навіть проста фізична активність для людини є важкою (витрачається багато ккал в розрахунку на 1 зусилля). Крім того при надмірній вазі є заборона на багато видів фізичної активності та їх інтенсивність, зокрема біг, стрибки, катання на велосипеді (схили та високоінтенсивне). В другому ж випадку людина витримує інтенсивні та тривалі навантаження, менше втомлюється, однак не має значної зайвої маси для швидких видимих покращень.

2. Наявність супутніх хвороб – захворювання, як діабет, заважають або ж і унеможливають процес зменшення ваги. А проблеми з суглобами накладають значні обмеження на фізичну активність. Судинні ж проблеми вимагають регулярної фізичної активності, але малоінтенсивної (пульс не більше 150).

3. Вік – обмеження на гнучкість, швидкість, динамічність і тривалість.

4. Стиль харчування – середня добова норма споживання калорій, а також (не)улюблені продукти (уникнення може відбуватися як з причин несмаку, так і цінових причин або наявності продукту в регіоні, що збільшує розмірність вибірки). Також можливі певні фізичні особливості, наприклад, головний біль при відсутності виробів з борошна в раціоні, що унеможливить взагалі подальшу фізичну активність, а з іншого боку вимагає споживання більшої кількості калорій, а отже і необхідності в більш інтенсивних або ж довгих тренуваннях.

5. Добова витрата калорій та фізична активність – залежить від виду фізичної активності, тривалості та тренуваності.

6. Самодисциплінованість і емоційна стабільність – людина може не вміти поводитися достатньо ефективно, якщо не бачить результату. До того ж, якщо підібране для людини тренування є якраз її нелюбленим (наприклад, не любить бігати), то процес швидко припиниться, людина почне робити все через силу, що спричинить до швидкої втрати інтересу до досягнення результату.

Насправді атрибутів може бути значно більше і ризиком використання такого багатоатрибутного набору даних є прокляття розмірності, яке найяскравіше проявляється за умов, коли розмірність (кількість атрибутів) перевищує розмір [2]. Однак, так як це рішення глибокоперсоналізоване і щоразу застосовуватиметься для однієї конкретної людини, то ця проблема менш актуальна. Пояснити це можна тим, що множинні тільки атрибути, тоді як розмір становить 1, що не призводить до кількості комбінацій, яка дорівнює добутку розміру та розмірності. Кількість комбінацій лише становить величини розмірностей в даному випадку. Таким чином, хоч вплив певного параметру на загальний ефект не завжди інтуїтивно очевидний, особливо враховуючи можливість взаємовпливу

різних параметрів між собою, однак справжнє прокляття розмірності яскраво б проявлялося, якщо б аналіз відбувався зразу на декількох пацієнтах. Тоді б, навіть у схожих пацієнтів можлива дещо різна реакція на однакові зовнішні чинники і їх взаємодію між собою, що сильно б ускладнювало аналіз даних і розуміння меж впливу окремих параметрів.

Для матеріалів статті взяті експериментальні дані, які неодноразово вимірювалися автором, втім у інших людей навіть співвідношення між витратою при різних активностях відрізнятиметься. Так, наприклад, було досліджено, що найвищу витрату калорій вдається досягти саме при високоінтенсивному динамічному катанні на велосипеді у місцевостях з чітко вираженим рельєфом (нааявністю схилів, спусків), а не наприклад бігу, на рівні аж до 800 ккал/год. Ще продуктивнішим видом спалювання можуть виступати стрибки, але без можливості зробити тривалість тренування достатньо довгою і велика витрата на одиницю часу компенсуватиметься малою протяжністю тренування і постійними перервами (тоді як велосипед часто дозволяє безперервну їзду). Для порівняння, під час бігу вдається спалювати не більше ніж 600 ккал/год, до того ж досягти відповідної тривалості, а також тренування на рельєфі – тяжче, ніж у випадку з велосипедом, який дозволяє зробити високоінтенсивне тренування 2-годинним, забезпечивши спалювання на рівні аж 1400 ккал (800 за першу годину та 600 за другу) лише за одне тренування. В той же час існують і інші фізичні активності, які можуть бути висококалорійними і навіть приємними, але можуть мати свої власні обмеження, наприклад недоступність протягом більшої частини року, зокрема ковзани. З іншого боку велосипед є достатньо гнучким інструментом і за необхідності дозволяє досягти навантажень менших ніж при бігу, і навіть при ходьбі, за умови спокійної їзди та відсутності рельєфу, що може бути рекомендованим для людей з обмеженнями на інтенсивність фізичних активностей, і частково це пояснюється можливістю велосипеда їхати накатом (при ходьбі все одно потрібно здійснювати рух ногами на кожен крок).

Оскільки йшлося про можливу взаємозалежність атрибутів між собою, то важливо щоб тренування не лише призводило до значного спалювання калорій, але й не призводило до несамовитого бажання споживати багато їжі після нього, що автоматично нівелювало б кількість витраченого обсягу. І реакція після тренування може сильно залежати від внутрішніх особливостей організму, а можливими з них є: втома, сильне виснаження, сильне бажання споживати їжу, обезводнення, відсутність реакції (в разі короткого, легкого тренування або хорошої адаптованості). До того ж для спалювання саме жирів, необхідна робота на певному пульсі (120–135, середньому), рівень якого втім може сильно різнитися навіть при абсолютно однаковій активності для різних людей, а спалювання саме жирів починається не відразу, а орієнтовно після 40 хвилин, тому короткі, навіть інтенсивні тренування, не завжди підходять для цієї цілі (а для людей з занадто надмірною вагою навіть протипоказані). Але навіть для 1-єї людини і в межах ітерації процес корекції можна розглядати як складну динамічну систему через можливість змін [3–5]. Одна ітерація означає процес схуднення за один підхід, тоді як різні ітерації – повторну потребу в схудненні в іншому віці. Зміна стратегії, навіть в межах ітерації, пояснюється тим, що коли людина має занадто надмірну вагу, то їй не можна займатися багатьма видами фізичної активності, а з іншого боку втрата калорій навіть при легкому русі і умовні –4кг за місяць – не важко (за наявності невеликого обсягу зайвої ваги це занадто інтенсивно). Але з часом організм пристосовується, активність стає легшою, її динамічність дозволяється збільшувати, однак і витрати стають меншими, тому рекомендаційна система потребує коригування. Крім того, типовим при схудненні є можливі відкоти системи до попереднього стану (так звані зриви) і їх ступінь та частота проявів залежить від конкретної людини. Так наприклад, при виснаженні від процесу і зниженні мотивації, можливе повернення до попередньої ваги і навіть ще більшої. Якщо ж розглядати процес зниження ваги навіть в контекстах різних ітерацій, то незважаючи на те, що це наче залишається одна і та ж людина, система все одно носить характер динамічності. І це можна довести через поняття віку. Якщо людина успішно пройшла процес корекції ваги за 7 років тому і зараз розраховує на те ж саме після повернення до попереднього стану, то така стратегія може не спрацювати, адже вік впливає на діапазон можливих фізичних активностей, споживання їжі, настрій і багато факторів, які можуть відрізнятися від попереднього стану людини декілька років тому.

Існує й ризик дезінформації, яка в умовах small data – шлях до кардинально неправильних висновків, адже small data більш чутливе до дезінформації в силу своїх розмірів (рис. 1). Це проявлятиметься коли пацієнт соромиться надавати показники, змінюючи їх зазвичай на певну реалістичну величину. Можлива і брехня про рівень мотивації на поточний момент та інші показники, що спричинить до отримання некоректних даних. Для боротьби з нею доцільно застосовувати ймовірнісні способи взаємодії з інформацією у small data, які крім даних включають і ймовірність появи їх. Так є можливість аналізувати поточні показники і прогрес людини в реальному часі і виявляти місця, де особа може прибірихувати за допомогою визначення ймовірності правдивості деяких даних, наданих користувачем. Для таких цілей підходять Баєсівські мережі довіри, що містять серію вершин та ребер і саме їх використання доцільне в контексті малих даних [6, 7]. Крім дезінформації є і неточності, зокрема округлення (наприклад, 70 кг замість 70.9). Авторка [8, 9] пропонує досліджувати інформацію з неточностями, чітко класифікуючи і поділяючи інформацію за видами неточності, оскільки методи боротьби з цим можуть бути різними.

Дезінформацію ж згідно [10] варто розрізняти за метою здійснення. Так інформація може бути misinformation (дезінформація, але без цілі зашкодити), disinformation (з метою введення в оману) або ж malinformation (правдива

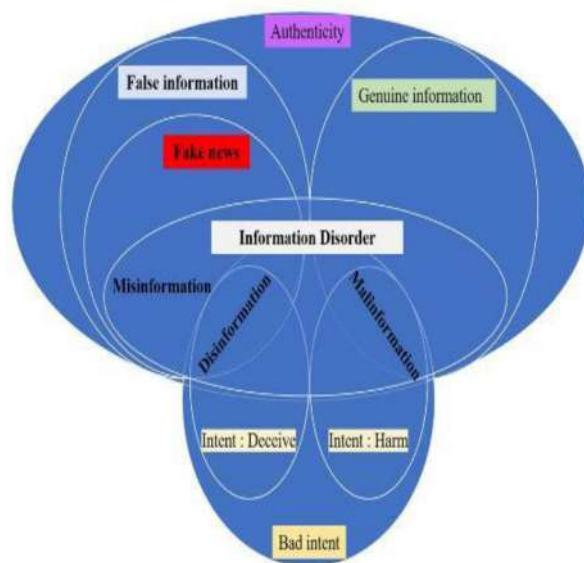


Рис. 1. Види дезінформації та її вплив на прийняття рішень

інформація, яка однак використана в контексті, який має на меті зашкодити, зокрема дані вирвані з контексту. В контексті пацієнта – «я схуд на 4 кг». Це можуть бути правдиві дані, але якщо подані як велике досягнення, але вага 160 кг, то 4 кг невідчутно, і це вже malinformation).

Висновки

У роботі досліджено прийняття рішень в умовах коли таке рішення здатне дати різний ефект для 2-ох схожих об'єктів, і навіть для одного в різні моменти його життєвого циклу. Науковою новизною роботи може вважатися дослідження взаємовпливу атрибутів на базі реальних емпіричних даних, отриманих із повсякденної життєвої практики індивіда (реальні поведінкові патерни, харчові звички, рівень фізичної активності, біометричні показники тощо), у медичній сфері, зокрема для моделювання персональної траєкторії корекції маси тіла та оцінки значущості кожного чинника в динаміці змін.

Список використаної літератури

1. Eric B. Hekler, Predrag Klasnja, Guillaume Chevanec, Natalie M. Golaszewski, Dana Lewis, Ida Sim. Why we need a small data paradigm. *BMC Medicine*. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12916-019-1366-x> (дата звернення: 11.12.2025).
2. Я. Повод, В. Шерстюк. Дослідження методів зменшення навчальної вибірки даних. URL: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=uk&user=-I16K2EAAAAJ&cstart=20&pagesize=80&citation_for_view=-I16K2EAAAAJ:nb7KW1ujOQ8C (дата звернення 11.12.2025).
3. В. А. Святний. Паралельне моделювання складних динамічних систем. URL: <https://pmap.donntu.edu.ua/sites/upload/articles/art137.pdf> (дата звернення 14.12.2025).
4. Hiroki Sayama. Introduction to the modeling and analysis of complex systems. С. 3–11, 27–35. URL: <https://knight scholar.geneseo.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1013&context=oer-ost> (дата звернення 14.12.2025).
5. M. San Miguel, J. H. Johnson, J. Kertesz, K. Kaski, A. Diaz-Guilera, R. S. MacKay, V. Loreto, P. Erdi, D. Helbing. Challenges in complex systems science. DOI: <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01694-y> (дата звернення 14.12.2025).
6. Lindsay C. Todman, Alex Bush, Amelia S.C. Hood. Small data for big insights in ecology. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.01.015> (дата звернення 13.12.2025).
7. Огнева О. Є. Інформаційна система підтримки прийняття рішень для моделювання врожайності гороху овочового. URL: <https://scholar.archive.org/work/vpcfxrukzjbs5lyv53vqgk6zp4/access/wayback/http://journals.kntu.net.ua/index.php/pit/article/download/625/784> (дата звернення 13.12.2025).
8. Шаховська Н. Б. Оцінювання якості консолідованих даних. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/113605/05-Shahovska.pdf?sequence=1> (дата звернення 12.12.2025).
9. Шаховська Н. Б. Дослідження якості консолідованих даних у просторах даних. URL: http://www.immsp.kiev.ua/publications/articles/2012/2012_1/01_2012_Shahovska.pdf (дата звернення 12.12.2025).
10. Esma Aimeur, Sabrine Amri, Gilles Brassard. Fake news, disinformation and misinformation in social media: a review. *Social Network Analysis and mining*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13278-023-01028-5> (дата звернення: 24.12.2025).

References

1. Hekler, E. B., Klasnja, P., Chevance, G., Golaszewski, N. M., Lewis, D., & Sim, I. (2019). Why we need a small data paradigm. *BMC Medicine*, 17(1), 133. <https://doi.org/10.1186/s12916-019-1366-x>
2. Povod, Y., Sherstjuk, V. (2020). Study of data sample reduction methods. *Problems of Information Technologies*, 27(1), 98–107. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=uk&user=-I16K2EAAAAJ&cstart=20&pagesize=80&citation_for_view=-I16K2EAAAAJ:nb7KW1ujOQ8C
3. Svjatnyj, V. A. (2006). Parallel modelling of complex dynamic systems. <https://pmap.donntu.edu.ua/sites/upload/articles/art137.pdf>
4. Sayama, Hiroki. (2015). Introduction to the modeling and analysis of complex systems. pp. 3–11, 27–35. Open SUNY Textbooks. <https://knightscholar.geneseo.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1013&context=oer-ost>
5. Miguel, M. S., Johnson, J. H., Kertesz, J., Kaski, K., Díaz-Guilera, A., MacKay, R. S., Loreto, V., Érdi, P., & Helbing, D. (2012). Challenges in complex systems science. *The European Physical Journal Special Topics*, 214(1), 245–271. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01694-y>
6. Todman, L. C., Bush, A., & Hood, A. S. (2023). ‘Small Data’ for big insights in ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 38(7), 615–622. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.01.015>
7. Ohnieva, O. Y. (2019). Decision support information system for modeling green pea yield. *Problems of information technologies*, 26(1). <https://scholar.archive.org/work/vpcfxfukzjbs5lyv53vqgk6zp4/access/wayback/http://journals.kntu.net.ua/index.php/pit/article/download/625/784>
8. Shakhovska, N. B. (2014). Consolidated data quality assessment. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/113605/05-Shahovska.pdf?sequence=1>
9. Shakhovska, N. B. (2012). Consolidated data quality researchement at data spaces. *Mathematical machines and systems*, 1(1). http://www.immsp.kiev.ua/publications/articles/2012/2012_1/01_2012_Shakhovska.pdf
10. Aïmeur, E., Amri, S., & Brassard, G. (2023). Fake news, disinformation and misinformation in social media: a review. *Social Network Analysis and Mining*, 13(1), 30. <https://doi.org/10.1007/s13278-023-01028-5>

Дата першого надходження статті до видання: 06.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

Л. М. МИХАЙЛОВА

кандидат технічних наук, професор

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

ORCID: 0000-0002-3419-5446

С. В. ВАСИЛЮК-ЗАЙЦЕВА

магістр філософії в фізиці, старший викладач

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: 0000-0002-0875-462X

О. В. РЕМЕНЯК

кандидат біологічних наук, доцент

Вінницький національний медичний університет імені М. І. Пирогова

ORCID: 0009-0001-0207-3073

БІОМЕДИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КРОВООБІГУ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СЕРЦЕВО-СУДИННИХ ІМПЛАНТАТІВ

Серцево-судинні імплантати (далі – ССІ) відіграють важливу роль у лікуванні різних кардіологічних захворювань, проте їхня ефективність часто залежить від гемодинамічних умов, які можуть змінюватися залежно від анатомії пацієнта та характеристик самого імплантату. Біомедичне моделювання кровообігу (далі – БМК) дає змогу детально дослідити гемодинамічні умови, що сприяє підвищенню надійності та функціональності імплантатів. Використання сучасних методів обчислювальної гідродинаміки забезпечує аналіз і оптимізацію ССІ, що визначає актуальність дослідження. Метою статті є обґрунтування використання БМК кровообігу для підвищення ефективності та надійності ССІ. У дослідженні застосовувалися методи аналізу, синтезу, абстрагування, індукції та дедукції для оцінки гемодинамічних параметрів, математичних моделей кровообігу та рекомендацій щодо їх застосування. Досліджено основні гемодинамічні параметри, що визначають ефективність ССІ. Зокрема, вивчено швидкість кровотоку, яка характеризує інтенсивність руху крові в судині та дозволяє виявити зони пришвидшення й застою. Кров'яний тиск відображає механічне навантаження на судинну стінку, що важливо для оцінки впливу імплантату. В'язкість крові визначає опір течії, що впливає на точність моделювання взаємодії з поверхнею імплантату. Сила тертя крові вздовж стінки судини (англ. Wall Shear Stress, далі – WSS) є критерієм ризику тромбоутворення, а пульсація кровотоку дає змогу аналізувати стабільність гемодинаміки в серцевому циклі. Проаналізовано сучасні математичні моделі кровообігу та підходи до їх застосування, зокрема рівняння Нав'є–Стокса, моделі пульсуючого потоку та взаємодії «рідина–структура». Розглянуто обчислювальні методи, такі як метод обчислювальної гідродинаміки (англ. Computational Fluid Dynamics, далі – CFD), метод скінченних елементів і метод скінченних об'ємів. Визначено програмні засоби, які використовуються для моделювання, зокрема ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics і OpenFOAM. Розроблено рекомендації щодо застосування БМК для підвищення функціональних характеристик і надійності ССІ. Запропоновано використовувати тривимірні пацієнт-специфічні моделі судин із високою просторовою роздільною здатністю, застосовувати пульсуючі граничні умови для відтворення реального серцевого циклу та використовувати неньютонівські моделі крові в зонах із низькими швидкостями зсуву. Також рекомендовано враховувати деформацію судинної стінки та імплантату за допомогою FSI-моделей та проводити порівняння результатів CFD-моделювання з експериментальними даними. Отримані результати підтверджують доцільність використання біомедичного моделювання кровообігу для оптимізації серцево-судинних імплантатів. Це дозволяє не лише підвищити їхню ефективність, але й знизити ризики ускладнень, пов'язаних із тромбоутворенням та іншими гемодинамічними порушеннями.

Ключові слова: гемодинаміка, швидкість кровотоку, кров'яний тиск, в'язкість крові, WSS, пульсація кровотоку, математичні моделі, обчислювальна гідродинаміка.

Л. М. MYKHAILOVA

PhD in Engineering Science, Professor

Higher Education Institution “Podillia State University”

ORCID: 0000-0002-3419-5446



S. V. VASYLYUK-ZAITSEVA

MPhil in Physics, Senior Lecturer

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

ORCID: 0000-0002-0875-462X

O. V. REMENIAK

PhD, Associate Professor

National Pirogov Memorial Medical University

ORCID: 0009-0001-0207-3073

BIOMEDICAL MODELING OF THE CIRCULATION TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF CARDIOVASCULAR IMPLANTS

Cardiovascular implants (hereinafter referred to as CVIs) play an important role in the treatment of various cardiovascular diseases; however, their effectiveness often depends on hemodynamic conditions, which may vary according to patient-specific anatomy and the characteristics of the implant itself. Biomedical blood flow modeling (hereinafter referred to as BBFM) enables a detailed investigation of hemodynamic conditions, thereby contributing to improved reliability and functionality of implants. The application of modern computational fluid dynamics methods provides analysis and optimization of CVIs, which determines the relevance of this study.

The aim of the article is to substantiate the use of biomedical blood flow modeling to enhance the efficiency and reliability of cardiovascular implants. The study employs methods of analysis, synthesis, abstraction, induction, and deduction to evaluate hemodynamic parameters, mathematical models of blood circulation, and recommendations for their application. Key hemodynamic parameters determining the effectiveness of CVIs are investigated. In particular, blood flow velocity is analyzed as a parameter characterizing the intensity of blood movement within vessels and enabling the identification of acceleration and stagnation zones. Blood pressure reflects the mechanical load on the vascular wall and is essential for assessing implant-induced effects. Blood viscosity determines flow resistance and affects the accuracy of modeling interactions with the implant surface. Wall shear stress (WSS) is identified as a criterion for thrombus formation risk, while blood flow pulsatility allows the analysis of hemodynamic stability throughout the cardiac cycle.

Contemporary mathematical models of blood circulation and approaches to their application are analyzed, including the Navier–Stokes equations, pulsatile flow models, and fluid–structure interaction (FSI) models. Computational methods such as computational fluid dynamics (CFD), the finite element method, and the finite volume method are considered. Software tools used for modeling are identified, including ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics, and OpenFOAM. Recommendations for the application of BBFM to improve the functional characteristics and reliability of CVIs are developed. The use of three-dimensional patient-specific vascular models with high spatial resolution is proposed, along with the application of pulsatile boundary conditions to reproduce the real cardiac cycle and non-Newtonian blood models in regions with low shear rates. Additionally, it is recommended to account for vascular wall and implant deformation using FSI models and to validate CFD results through comparison with experimental data.

The obtained results confirm the feasibility of using biomedical blood flow modeling for the optimization of cardiovascular implants. This approach not only enhances their effectiveness but also reduces the risks of complications associated with thrombosis and other hemodynamic disturbances.

Key words: hemodynamics, blood flow velocity, blood pressure, blood viscosity, WSS, blood flow pulsation, mathematical models, computational hydrodynamics.

Постановка проблеми

Серцево-судинні захворювання є однією з основних причин смертності у світі, що підкреслює необхідність розроблення ефективних ССІ. Попри значний прогрес у медицині та технологіях, наявні імплантати часто проєктуються на основі емпіричних даних або з використанням спрощених розрахункових схем. Це призводить до недостатнього врахування складної тривимірної геометрії кровотоку та локальних гемодинамічних ефектів, що, відповідно, впливає на їхню ефективність і надійність.

Однією з важливих інженерних проблем є недостатня точність прогнозування розподілу напружень зсуву на стінках судин. Це може призводити до утворення зон з аномально низькими або високими значеннями напружень зсуву, що створює умови для тромбоутворення або пошкодження ендотелію. Неправильне проєктування імплантатів також може призвести до підвищеного гідравлічного опору, що негативно впливає на енергетичні витрати серця та загальну гемодинаміку пацієнта.

Традиційні методи експериментального тестування, зокрема використання фізичних фантомів і тваринних моделей, характеризуються високою вартістю та значними часовими витратами, що обмежує можливості оперативного аналізу й порівняння різних конструктивних рішень із метою вибору оптимального варіанта. Це зумовлює потребу у впровадженні більш ефективних і економічно доцільних підходів, зокрема біомедичного комп'ютерного моделювання кровообігу.

Таким чином, існує нагальна потреба в удосконаленні БМК для підвищення ефективності та надійності ССІ. Це дослідження має на меті розробити нові підходи до моделювання, які враховують складні гемодинамічні параметри та локальні ефекти, що дозволить значно поліпшити результати лікування пацієнтів із серцево-судинними захворюваннями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні підходи до моделювання гемодинамічних процесів у системах із ССІ ґрунтуються на чисельних методах CFD. Значну увагу приділено моделюванню кровотоку в коронарних артеріях зі стентами, де дослідження використовували як ідеалізовані, так і пацієнт-специфічні геометрії. Ідеалізовані моделі дозволяють оцінити вплив ступеня стенозу, діаметра стента, товщини стінки та форми комірок на розподіл швидкостей і напружень зсуву. Так, З. Саїб та співавтори (Z. Saib et al.), М. Макрейлд та колеги (M. MacRaid et al.) демонструють, що геометрія імплантату критично впливає на локальні гемодинамічні характеристики, проте обмеження моделей полягає в припущенні жорсткості стінок судин та використанні стаціонарних граничних умов замість пульсуючого потоку. Для чисельного розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса застосовувалися схеми скінченних об'ємів та скінченних елементів, а для турбулентних режимів – моделі k- ϵ та LES, що дозволяє частково відтворювати низькорейнольдсівський потік крові [1; 2].

Другим важливим напрямом є врахування реологічних властивостей крові. Частина дослідників, зокрема К. Герасимюк та співавтори, О. Волошина та колеги, спрощують моделювання, використовуючи ньютонівську модель крові, що забезпечує прийнятну точність при високих швидкостях потоку [3; 4]. Інші науковці, такі як М. Хаміда (M. Hamidah), С. Хоссейн (S. Hossain), застосовують неньютонівські моделі типу Carreau або Casson, які точніше описують зміну в'язкості крові при низьких швидкостях зсуву, особливо в зонах поблизу стенозу чи стента [5]. Аналіз літератури показує, що для низькорейнольдсівських потоків перехід на неньютонівську модель суттєво покращує достовірність прогнозів.

Особливу увагу взаємодії рідини й твердого тіла (FSI), що дозволяє врахувати пружність стінок судин та їхню деформацію під дією пульсуючого потоку крові, приділяють Д. Шестеріна та співавтори, О. Обертинська та колеги. Такі моделі мають більшу обчислювальну складність, проте дають змогу оцінити зміну локального діаметра судини під час серцевого циклу та її вплив на розподіл напружень у стінках стента. Для розв'язання FSI-задач застосовувалися пакети ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics та відкриті платформи, які дозволяють поєднувати моделювання ламінарного й турбулентного потоку з механічною деформацією стінки [6; 7].

На необхідності валідації CFD-моделей на експериментальних даних акцентують А. Бронюк, Л. Распутіна та М. Котелюк (M. Koteliukh). Для цього використовуються фантоми судин, лазерна доплерівська анемометрія, PIV та MRI, що дозволяє порівнювати розподіл швидкостей і тисків із чисельними результатами. Узгодження експериментальних та CFD-даних підвищує надійність моделі та обґрунтовує вибір параметрів для власних досліджень [8; 9; 10].

Попри значний прогрес у розвитку методів моделювання гемодинаміки та CFD-досліджень, більшість наукових робіт охоплюють лише окремі аспекти кровотоку й не забезпечують комплексного аналізу впливу кількох параметрів стента одночасно. Також недостатньо уваги приділено компромісу між зниженням гідравлічного опору та мінімізацією зон із низькими напруженнями зсуву. Виявлені прогалини підкреслюють актуальність комплексного моделювання та параметричного аналізу конструктивних характеристик ССІ.

Формулювання мети дослідження

Мета статті – обґрунтувати використання БМК кровообігу для підвищення ефективності та надійності ССІ.

Відповідно до мети сформульовано такі завдання:

- 1) дослідити основні гемодинамічні параметри, що визначають ефективність ССІ;
- 2) проаналізувати сучасні математичні моделі кровообігу та підходи до їх застосування з використанням обчислювальних методів;
- 3) розробити рекомендації щодо застосування БМК для підвищення функціональних характеристик і надійності ССІ.

Викладення основного матеріалу дослідження

Гемодинаміка як розділ біомеханіки досліджує закономірності руху крові в судинній системі та механічні взаємодії між кров'ю й стінками судин. Кров розглядається як складна неньютонівська рідина, реологічні властивості якої змінюються залежно від умов течії, зокрема від швидкості зсуву та геометрії судинного русла. Ці особливості є важливими при вивченні кровотоку в зоні ССІ, де геометрія потоку суттєво відрізняється від природної.

Основні гемодинамічні параметри, що визначають ефективність і безпеку ССІ, охоплюють швидкість кровотоку, кров'яний тиск, ефективну в'язкість крові, WSS та пульсаційні характеристики потоку. Сукупний аналіз цих параметрів є необхідним для виявлення зон застою крові, підвищених механічних навантажень і потенційного тромбоутворення, що дозволяє обґрунтовано оцінювати функціонування імплантатів у фізіологічних умовах кровообігу. Гемодинамічні параметри та їх значення для оцінювання ефективності ССІ наведено в таблиці 1.

Гемодинамічний стан кровообігу описується через взаємопов'язані параметри, серед яких важливу роль відіграють швидкість руху крові, кров'яний тиск, ефективна в'язкість та напруження зсуву на стінці судини. Останній

Таблиця 1

Гемодинамічні параметри та їх значення для оцінювання ефективності ССІ

Параметр	Фізичний зміст	Значення для аналізу імплантатів
Швидкість кровотоку	Характеризує інтенсивність руху крові в судині	Дозволяє виявити зони пришвидшення та застою крові поблизу імплантату
Кров'яний тиск	Відображає механічне навантаження на судинну стінку	Використовується для оцінки впливу імплантату на навантаження судин
В'язкість крові	Визначає опір течії крові	Впливає на точність моделювання взаємодії крові з поверхнею імплантату
WSS	Сила тертя крові вздовж стінки судини	Є критерієм ризику тромбоутворення та ушкодження ендотелію
Пульсація кровотоку	Часова зміна параметрів кровообігу	Дає змогу аналізувати стабільність гемодинаміки в серцевому циклі

Джерело: створено авторами на основі [11, с. 2; 12, с. 5; 13, с. 6; 14, с. 8; 15, с. 3]

показник, відомий як WSS, є одним із найбільш інформативних критеріїв при оцінюванні функціонування імплантатів, оскільки його зміни безпосередньо пов'язані з ризиком тромбоутворення, ушкодження ендотелію та розвитком рестенозу [11, с. 2]. У нормальних умовах кровотік у судинах має переважно ламінарний характер, однак імплантатія штучних конструкцій може призводити до локальних порушень течії, формування зон турбулентності та застою крові. Додатковим ускладнювальним чинником є пульсуючий характер кровотоку, зумовлений циклічною роботою серця, що вимагає врахування часової змінності параметрів під час моделювання [12, с. 5].

У цьому контексті БКМ є ефективним інструментом дослідження гемодинамічних процесів. Це міждисциплінарний підхід, який поєднує методи прикладної математики, обчислювальної гідродинаміки та інформаційних технологій для відтворення кровообігу в умовах, наближених до реальних. Застосування БКМ дозволяє прогнозувати зміну гемодинамічних характеристик у відповідь на модифікацію геометрії судин або властивостей імплантату, що є особливо важливим на етапі проектування та оптимізації серцево-судинних виробів. Крім того, використання комп'ютерних моделей сприяє зменшенню потреби в трудомістких та дорогих експериментах, забезпечуючи при цьому високий рівень інформативності результатів [13, с. 6].

ССІ, зокрема стенти, судинні протези, штучні клапани та механічні допоміжні пристрої кровообігу, розглядаються як складні інженерні об'єкти, що функціонують у динамічному біологічному середовищі. Ефективність їхньої роботи значною мірою визначається здатністю мінімізувати порушення локальної гемодинаміки та підтримувати стабільний кровотік [14, с. 8]. БКМ дозволяє детально дослідити характер взаємодії крові з матеріалом і поверхнею імплантату, оцінити вплив конструктивних рішень на гемодинамічні показники та обґрунтувати вибір оптимальної геометрії й матеріалів [15, с. 3].

Таким чином, застосування БКМ для підвищення ефективності ССІ є науково обґрунтованим підходом, що забезпечує системний аналіз гемодинамічних процесів з урахуванням як фізіологічних, так і технічних чинників.

У процесі систематизації підходів до математичного моделювання кровообігу основну увагу зосереджено на моделях, які дозволяють адекватно описати гемодинамічні процеси в умовах наявності ССІ (табл. 2).

Базою сучасного БКМ є рівняння Нав'є–Стокса, що описують рух в'язкої рідини та є основою обчислювальної гідродинаміки. Чисельне розв'язання цих рівнянь здійснюється із застосуванням спеціалізованих програмних пакетів, таких як ANSYS Fluent, OpenFOAM, COMSOL Multiphysics або SimVascular, що дозволяють моделювати складні гемодинамічні процеси в тривимірних судинах. Використання таких платформ забезпечує дискретизацію об'єму судини на дрібні елементи та розрахунок розподілу швидкості, тиску й напружень зсуву в кожній точці моделі. Програмні засоби враховують неньютонівські властивості крові, пульсації, локальні турбулентні ефекти та взаємодію потоку з поверхнею імплантату, що дозволяє отримати достовірні прогнози гемодинамічних характеристик і оцінити вплив геометрії та матеріалу імплантату на кровотік. Це створює підґрунтя для формування науково обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення ефективності та надійності серцево-судинних конструкцій [16, с. 2].

Математичний опис кровообігу в ССІ базується на основних рівняннях гідродинаміки, серед яких рівняння нерозривності та рівняння Нав'є–Стокса, а за необхідності застосовується модель турбулентності. Рівняння нерозривності забезпечує збереження маси потоку та для нестисливої рідини записується у вигляді:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

де $\mathbf{u}$ – вектор швидкості потоку.

Рівняння Нав'є–Стокса описує рух нестисливої рідини, урахувавши інерційні та в'язкі сили, і для нестисливої рідини має форму:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}, \quad (2)$$

де $\mathbf{u}$ – вектор швидкості (м/с), t – час (с), ρ – густина рідини (кг/м³), p – тиск (Па), ν – кінематична в'язкість рідини (м²/с), $\mathbf{f}$ – вектор зовнішніх сил на одиницю об'єму (Н/м³), наприклад сила тяжіння.

Таблиця 2

Математичні та обчислювальні підходи до моделювання кровообігу для ССІ

Група підходів	Модель / метод	Коротка характеристика	Застосування у ССІ
Математичні моделі кровообігу	Рівняння Нав'є–Стокса	Описують рух в'язкої рідини з урахуванням швидкості, тиску та в'язкості	Аналіз розподілу гемодинамічних параметрів у зоні імплантації
	Моделі пульсуючого потоку	Враховують часову змінність кровотоку в серцевому циклі	Дослідження динамічної стабільності кровообігу після імплантації
	Моделі взаємодії «рідина–структура»	Поєднують рух крові з деформацією судинної стінки або імплантату	Оцінювання механічного навантаження та ризику ушкодження судин
	Реологічні моделі крові	Описують змінну в'язкість крові залежно від умов течії	Підвищення точності моделювання в зонах зі зміненою геометрією
Обчислювальні методи	CFD	Чисельне розв'язання рівнянь гідродинаміки	Детальний аналіз локальних ефектів кровотоку навколо імплантатів
	Метод скінченних елементів	Дискретизація розрахункової ділянки на елементи	Моделювання складних геометрій та FSI-задач
	Метод скінченних об'ємів	Баланс потоків у скінченних контрольних об'ємах	Стійкі розрахунки тиску та швидкості у CFD-моделях
Програмні засоби	ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics	Комерційні платформи для CFD та мультифізичного аналізу	Реалізація високоточних моделей кровообігу та імплантатів
	OpenFOAM	Відкрите програмне середовище для CFD	Гнучке налаштування моделей та алгоритмів
	MATLAB / Simulink, Python	Інструменти для чисельних розрахунків і обробки даних	Аналіз результатів моделювання та побудова власних алгоритмів
Підходи до моделювання	Ідеалізовані геометрії	Спрощене представлення судин та імплантатів	Виявлення загальних закономірностей гемодинаміки
	Пацієнт-специфічні моделі	Геометрії на основі КТ або МРТ	Персоналізована оцінка ефективності імплантатів
	Аналіз чутливості параметрів	Дослідження впливу вхідних даних на результат	Оцінювання надійності та стійкості моделей

Джерело: створено авторами на основі [16, с. 2; 17, с. 3; 18, с. 5; 19, с. 2393; 20, с. 108; 21, с. 22]

Якщо кровотік є турбулентним, для врахування турбулентних пульсацій застосовується модель турбулентності, зокрема k - ϵ , яка вводить два додаткові рівняння. Рівняння для кінетичної енергії турбулентності k має вигляд:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (ku) = P_k - \epsilon - \nabla \cdot (\mu_t \nabla k), \quad (3)$$

а рівняння для дисипації турбулентності ϵ записується як:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon u) = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} - \nabla \cdot (\mu_t \nabla \epsilon), \quad (4)$$

де P_k описує виробництво турбулентної енергії, μ_t – динамічна в'язкість турбулентності, а $C_{\epsilon 1}$ і $C_{\epsilon 2}$ – емпіричні константи моделі [17, с. 5].

Застосування рівнянь Нав'є–Стокса разом із відповідними початковими та граничними умовами дозволяє моделювати кровотік у ССІ, урахувавши як ламінарні, так і турбулентні режими. Це дає змогу кількісно оцінювати розподіл швидкості, тиску та напружень зсуву на стінках судин, що є критично важливим для оптимізації конструкції імплантатів. Оскільки кровообіг характеризується циклічною пульсацією, моделі враховують часову змінність параметрів потоку, що дозволяє більш точно відтворювати динамічну поведінку крові протягом серцевого циклу.

Реологічні властивості крові, що можуть змінюватися залежно від швидкості зсуву, моделюються з використанням моделей Casson або Carreau–Yasuda, що забезпечує адекватне відтворення фізіологічних умов, особливо в зонах складної геометрії поблизу імплантатів [17, с. 3]. Для підвищення реалістичності моделювання дедалі частіше застосовується взаємодія «рідина–структура», яка дозволяє оцінити вплив деформації судинної стінки та імплантату на гемодинаміку. Такий підхід дає змогу враховувати механічні навантаження на тканини, зміни еластичних властивостей судин і потенційні ризики ушкоджень, водночас вимагаючи підвищених обчислювальних ресурсів і точності вихідних даних [18, с. 5].

Реалізація математичних моделей кровообігу на практиці базується на сучасних обчислювальних методах, зокрема методах скінченних елементів та скінченних об'ємів, що дозволяє аналізувати як глобальні характеристики кровотоку, так і детальні локальні процеси [19, с. 2393]. Програмні засоби автоматизують побудову геометрії, генерацію розрахункових сіток, проведення симуляцій і аналіз результатів, забезпечуючи точність і відтворюваність моделювання. Використання як ідеалізованих геометрій, так і пацієнт-специфічних моделей на основі

даних КТ та МРТ дозволяє проводити персоналізований аналіз ефективності імплантатів та оцінювати клінічну значущість результатів [20, с. 108].

Додатковим етапом є аналіз чутливості моделей до зміни реологічних властивостей крові, граничних умов та геометрії імплантатів, що дозволяє визначити основні чинники, які суттєво впливають на гемодинамічну ефективність серцево-судинних конструкцій [21, с. 22].

Використання сучасних моделей та обчислювальних підходів дає низку переваг, зокрема можливість відтворювати складні гемодинамічні процеси з високою точністю, проводити пацієнт-специфічне моделювання для персоналізованого підходу, прогнозувати зони застою, підвищені механічні навантаження та потенційне тромбоутворення, оптимізувати геометрію й матеріали імплантатів без численних фізичних експериментів, а також оцінювати вплив різних конструктивних рішень на локальні та глобальні гемодинамічні показники.

Водночас використання таких моделей має певні обмеження, зокрема високу обчислювальну складність і тривалий час симуляцій, необхідність точних клінічних даних для валідації моделей, можливі спрощення фізіологічних умов у випадку ідеалізованих геометрій, чутливість результатів до вибору чисельних методів, турбулентних моделей і граничних умов, а також складність інтеграції FSI-моделей у великі обчислювальні проєкти через високі вимоги до ресурсів.

У зв'язку з цим розроблено комплекс рекомендацій щодо застосування БКМ кровообігу для підвищення точності гемодинаміки, оптимізації конструкцій імплантатів та покращення їхніх характеристик. Тривимірне геометричне моделювання з урахуванням анатомічних особливостей пацієнтів підвищує точність оцінки гемодинамічних параметрів і зменшує ризик проєктних помилок. Використання пульсуючих граничних умов відтворює реальний серцевий цикл, а неньютонівські моделі крові дозволяють прогнозувати зони застою та знизити ризик тромбоутворення. Адаптовані моделі турбулентності та FSI-моделі оцінюють критичні ділянки потоку й механічні напруження, що важливо для довговічності імплантатів. Чисельні методи та валідація моделей з експериментальними даними забезпечують достовірність результатів, а параметричний аналіз дозволяє визначити оптимальні конструктивні рішення для підвищення ефективності та безпеки ССІ.

Таким чином, комплексне використання математичних моделей, обчислювальних методів і сучасних програмних засобів формує цілісний інструментарій для аналізу кровообігу та обґрунтованого проєктування ССІ, що підвищує їхню клінічну ефективність і безпеку, одночасно визначаючи перспективи для подальшого вдосконалення чисельних методів і програмних платформ.

Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що основні гемодинамічні параметри, зокрема швидкість кровотоку, кров'яний тиск, ефективна в'язкість крові, напруження зсуву на стінці судини та пульсаційні характеристики потоку, є визначальними для оцінювання ефективності й безпеки серцево-судинних імплантатів. Їх комплексний аналіз дає змогу ідентифікувати зони застою крові, підвищених механічних навантажень і потенційного тромбоутворення, що має принципове значення для прогнозування функціонування імплантатів у фізіологічних умовах кровообігу.

Узагальнення сучасних математичних моделей кровообігу та обчислювальних підходів показало, що застосування CFD-методів, моделей пульсуючого потоку, неньютонівської реології крові та підходів взаємодії «рідина–структура» забезпечує високий рівень точності відтворення складних гемодинамічних процесів і створює передумови для пацієнт-специфічного моделювання. Це надає можливості для оптимізації геометрії та матеріалів імплантатів, а також для обґрунтованої оцінки впливу конструктивних рішень на локальні й глобальні гемодинамічні показники.

Водночас встановлено, що практичне застосування зазначених підходів обмежується високою обчислювальною складністю, значними часовими витратами на симуляції, залежністю результатів від якості клінічних даних, вибору чисельних методів і граничних умов, а також складністю інтеграції FSI-моделей у масштабні обчислювальні проєкти. Це зумовлює необхідність подальшого розвитку методів чисельного моделювання та підвищення їхньої обчислювальної ефективності для розширення використання в клінічній практиці.

Отримані результати дозволили сформулювати цілісний комплекс рекомендацій щодо застосування біомеханічного комп'ютерного моделювання з метою підвищення функціональних характеристик і надійності серцево-судинних імплантатів. Наукова новизна дослідження полягає в інтеграції пацієнт-специфічної геометрії, реалістичних гемодинамічних умов, неньютонівської поведінки крові, турбулентних ефектів і деформацій судинної стінки в єдиному обчислювальному підході, що забезпечує більш адекватне відтворення фізіологічних процесів кровообігу.

Практичне значення запропонованого підходу полягає в можливості оптимізації конструктивних параметрів імплантатів, зниження ризику післяопераційних ускладнень та підвищення достовірності прогнозування їхньої довговічності, що розширює потенціал використання комп'ютерного моделювання як інструменту підтримки інженерних рішень і клінічної практики.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням параметричних досліджень геометрії та матеріалів імплантатів, інтеграцією персоналізованих клінічних даних, розвитком багатомасштабних та адаптивних FSI-моделей, а також упровадженням методів машинного навчання для прискорення аналізу й оптимізації конструктивних рішень у серцево-судинній інженерії.

Список використаної літератури

1. Saib Z. A., Abed F., Ghayesh M. H., Amabili M. A review of fluid-structure interaction: blood flow in arteries. *Biomedical Engineering Advances*. 2025. Vol. 9. № 2. Article 100171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bea.2025.100171>
2. MacRaild M., Sarrami-Foroushani A., Lassila T., Frangi A. F. Accelerated simulation methodologies for computational vascular flow modelling. *Journal of the Royal Society Interface*. 2024. Vol. 21, № 211. Article 20230565. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsif.2023.0565>
3. Герасимюк К. О., Гнатів В. В., Левенець О. О. Ультраструктурні прояви протекторного впливу на міокард бурштинової кислоти, оксидутирату натрію і кверцетину за умов експериментального моделювання серцевої недостатності. *Здобутки клінічної і експериментальної медицини*. 2024. № 1. С. 62–69. DOI: <https://doi.org/10.11603/1811-2471.2024.v.i1.14526>
4. Шляхи удосконалення формування компетенцій лікарів-інтернів в умовах дистанційного навчання / О. Б. Волошина та ін. *Здобутки клінічної і експериментальної медицини*. 2024. № 1. С. 57–61. DOI: <https://doi.org/10.11603/1811-2471.2024.v.i1.14444>
5. Hamidah M. A., Hossain S. M. C. Modeling analysis of pulsatile non-Newtonian blood flow in a renal bifurcated artery with stenosis. *International Journal of Thermofluids*. 2024. Vol. 22. № 2. Article 100645. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100645>
6. Шестеріна Д. В., Паламарчук А. Л., Коваленко С. О. Вплив об'ємного пневмопресингу на периферичну гемодинаміку у осіб з різним рівнем кровонаповнення нижніх кінцівок. *Здобутки клінічної і експериментальної медицини*. 2023. № 3. С. 190–194. DOI: <https://doi.org/10.11603/1811-2471.2023.v.i3.14089>
7. Обертинська О. Г., Распутіна Л. В., Діденко Д. В., Соломончук А. В. Ремодельовання лівого шлуночка після черезшкірного коронарного втручання при гострому інфаркті міокарда з ускладненням гострою серцевою недостатністю. *Український журнал серцево-судинної хірургії*. 2024. Т 32, № 2. С. 38–44. DOI: [https://doi.org/10.30702/ujcvs/24.32\(02\)/or030-3844](https://doi.org/10.30702/ujcvs/24.32(02)/or030-3844)
8. Бронюк А. В., Распутіна Л. В. Пацієнти зі STEMI після реваскуляризації: чи є залежність ураження коронарних артерій та функціонального стану нирок? *Український журнал серцево-судинної хірургії*. 2024. Т. 32, № 3. С. 10–16. DOI: [https://doi.org/10.30702/ujcvs/24.32\(03\)/br043-1016](https://doi.org/10.30702/ujcvs/24.32(03)/br043-1016)
9. Koteliukh M. Y. A model for predicting acute heart failure in patients with acute myocardial infarction by taking into account energy and adipokine metabolism indicators. *Medicni perspektivi*. 2022. Vol. 27, № 3. P. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.26641/2307-0404.2022.3.265932>
10. Koteliukh M. Y. A model for predicting late complications of myocardial infarction in patients with type 2 diabetes mellitus. *Archives of the Balkan Medical Union*. 2022. Vol. 57, № 1. P. 36–44. DOI: <https://doi.org/10.31688/abmu.2022.57.1.05>
11. Dake P. G., Mukherjee J., Sahu K. C., Pandit A. B. Computational fluid dynamics in cardiovascular engineering: a comprehensive review. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*. 2024. Vol. 9. P. 335–362. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41403-024-00478-3>
12. Salman H. E., Yalcin H. C. Computational modeling of blood flow hemodynamics for biomechanical investigation of cardiac development and disease. *Journal of Cardiovascular Development and Disease*. 2021. Vol. 8, № 2. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcdd8020014>
13. Hu M., Chen B., Luo Y. Computational fluid dynamics modelling of hemodynamics in aortic aneurysm and dissection: a review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2025. Vol. 13. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1556091>
14. Can computational fluid dynamics simulations predict a distal stent graft-induced new entry after frozen elephant trunk operation? / A. Osswald et al. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. 2025. Vol. 12. DOI: <https://doi.org/10.3389/fcvm.2025.1671628>
15. Dung N. T., Hue P. T., Nhung D. C., Sang P. V. Hemodynamics in coronary arteries: using open-source software Simvascular to investigate the hemodynamics in coronary arteries of the patient-specific modeling. *Vietnam Journal of Science and Technology*. 2024. Vol. 62, № 3. P. 601–611. DOI: <https://doi.org/10.15625/2525-2518/18503>
16. Hirschhorn M., Tchanchaleishvili V., Stevens R., Rossano J., Throckmorton A. Fluid–structure interaction modeling in cardiovascular medicine – a systematic review 2017–2019. *Medical Engineering & Physics*. 2020. Vol. 78. № 1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2020.01.008>
17. Kuchumov A. G., Makashova A., Vladimirov S., Borodin V., Dokuchaeva A. Fluid–structure interaction aortic valve surgery simulation: a review. *Fluids*. 2023. Vol. 8, № 11, Article 295. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids8110295>
18. Automated generation of 0D and 1D reduced-order models of patient-specific blood flow / M. R. Pfaller et al. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*. 2022. Vol. 38, № 10. Article e3639. DOI: <https://doi.org/10.1002/cnm.3639>
19. A geometric multiscale model for the numerical simulation of blood flow in the human left heart / A. Zingaro et al. *Discrete and Continuous Dynamical Systems – Series S*. 2022. Vol. 15, № 8. P. 2391–2427. DOI: <https://doi.org/10.3934/dcdss.2022052>

20. Феденко С., Волошенюк Т., Різак Г. Аналіз впливу інноваційних технологій на розвиток фармацевтичного ринку в Україні. *Сучасна медицина, фармація та психологічне здоров'я*. 2024. № 2 (16). С. 106–110. DOI: <https://doi.org/10.32689/2663-0672-2024-2-17>

21. COVID-19, пандемічний грип А(H1N1): клінічні та патологоанатомічні порівняння / Г. І. Граділь та ін. *Інфекційні хвороби*. 2023. № 3. С. 15–27. DOI: <https://doi.org/10.11603/1681-2727.2023.3.14197>

References

1. Saib Z. A., Abed F., Ghayesh M. H., & Amabili M. (2025) A review of fluid–structure interaction: blood flow in arteries. *Biomedical Engineering Advances*, vol. 9, 100171. <https://doi.org/10.1016/j.bea.2025.100171>
2. MacRaild M., Sarrami-Foroushani A., Lassila T., & Frangi A. F. (2024) Accelerated simulation methodologies for computational vascular flow modelling. *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 21, no. 211, 20230565. <https://doi.org/10.1098/rsif.2023.0565>
3. Herasymuk K. O., Hnativ V. V., & Levenets O. O. (2024) Ultrastrukturni proiavy protekornoho vplyvu na miokard burshtynovoi kysloty, oksybutyratu natriu i kvartsetynu za umov eksperymentalnoho modeliuвання sertsevoi nedostatnosti. [Ultrastructural manifestations of the protective effect on the myocardium of succinic acid, sodium oxybutyrate, and quercetin under conditions of experimental modeling of heart failure]. *Zdobutky klinichnoi i eksperymentalnoi medytsyny*, no. 1, pp. 62–69. <https://doi.org/10.11603/1811-2471.2024.v.i1.14526>
4. Voloshyna O. B., Balashova I. V., Lysyi I. S., Dukova O. R., Naidonova O. V., Zbitnieva V. O., ... & Ukrainka K. A. (2024) Shliakhy udoskonalennia formuvannia kompetentsii likariv-interniv v umovakh dystantsiinoho navchannia. [Ways to improve the formation of competencies of interns in distance learning]. *Zdobutky klinichnoi i eksperymentalnoi medytsyny*, no. 1, pp. 57–61. <https://doi.org/10.11603/1811-2471.2024.v.i1.14444>
5. Hamidah M. A., & Hossain S. M. C. (2024) Modeling analysis of pulsatile non-Newtonian blood flow in a renal bifurcated artery with stenosis. *International Journal of Thermofluids*, vol. 22, no. 2, 100645. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100645>
6. Shesterina D. V., Palamarchuk A. L., & Kovalenko S. O. (2023) Vplyv obiemnoho pnevmopresynhu na peryferychnu hemodynamiku u osib z riznym rivnem krovonapovnennia nyzhnikh kintsivok. [The effect of volume pneumopressing on peripheral hemodynamics in individuals with different levels of blood filling of the lower extremities]. *Zdobutky klinichnoi i eksperymentalnoi medytsyny*, no. 3, pp. 190–194. <https://doi.org/10.11603/1811-2471.2023.v.i3.14089>
7. Obertynska O. H., Rasputina L. V., Didenko D. V., & Solomonchuk A. V. (2024) Remodeliuвання livoho shlunochka pislia cherezshkirnoho koronarnoho vtruchannia pry hostromu infarkti miokarda z uskladnenniam hostroiu sertsevoi nedostatnistiu. [Left ventricular remodeling after percutaneous coronary intervention in acute myocardial infarction complicated by acute heart failure]. *Ukrainskyi zhurnal sertsevo-sudynnoi khirurhii*, vol. 32, no. 2, pp. 38–44. [https://doi.org/10.30702/ujcvs/24.32\(02\)/or030-3844](https://doi.org/10.30702/ujcvs/24.32(02)/or030-3844)
8. Broniuk A. V., & Rasputina L. V. (2024) Patsiienty zi STEMI pislia revaskulyaryzatsii: chy ye zalezhnist urazhennia koronarnykh arterii ta funktsionalnoho stanu nyrok? [Patients with STEMI after revascularization: is there a relationship between coronary artery disease and renal function?]. *Ukrainskyi zhurnal sertsevo-sudynnoi khirurhii*, vol. 32, no. 3, pp. 10–16. [https://doi.org/10.30702/ujcvs/24.32\(03\)/br043-1016](https://doi.org/10.30702/ujcvs/24.32(03)/br043-1016)
9. Koteliukh M. Y. (2022) A model for predicting acute heart failure in patients with acute myocardial infarction by taking into account energy and adipokine metabolism indicators. *Medicni perspektivi*, vol. 27, no. 3, pp. 64–71. <https://doi.org/10.26641/2307-0404.2022.3.265932>
10. Koteliukh M. Y. (2022) A model for predicting late complications of myocardial infarction in patients with type 2 diabetes mellitus. *Archives of the Balkan Medical Union*, vol. 57, no. 1, pp. 36–44. <https://doi.org/10.31688/abmu.2022.57.1.05>
11. Dake P. G., Mukherjee J., Sahu K. C., & Pandit A. B. (2024) Computational fluid dynamics in cardiovascular engineering: a comprehensive review. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, vol. 9, pp. 335–362. <https://doi.org/10.1007/s41403-024-00478-3>
12. Salman H. E., & Yalcin H. C. (2021) Computational modeling of blood flow hemodynamics for biomechanical investigation of cardiac development and disease. *Journal of Cardiovascular Development and Disease*, vol. 8, no. 2. <https://doi.org/10.3390/jcdd8020014>
13. Hu M., Chen B., & Luo Y. (2025) Computational fluid dynamics modelling of hemodynamics in aortic aneurysm and dissection: a review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 13. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1556091>
14. Osswald A., Tsagakis K., Thielmann M., Shehada S.-E., Jánosi R. A., ... & Karmonik C. (2025) Can computational fluid dynamics simulations predict a distal stent graft-induced new entry after frozen elephant trunk operation? *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, vol. 12. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2025.1671628>
15. Dung N. T., Hue P. T., Nhung D. C., & Sang P. V. (2024) Hemodynamics in coronary arteries: using open-source software SimVascular to investigate the hemodynamics in coronary arteries of patient-specific modeling. *Vietnam Journal of Science and Technology*, vol. 62, no. 3, pp. 601–611. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/18503>

16. Hirschhorn M., Tchanchaleishvili V., Stevens R., Rossano J., & Throckmorton A. (2020) Fluid–structure interaction modeling in cardiovascular medicine – a systematic review 2017–2019. *Medical Engineering & Physics*, vol. 78, no. 1. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2020.01.008>
17. Kuchumov A. G., Makashova A., Vladimirov S., Borodin V., & Dokuchaeva A. (2023) Fluid–structure interaction aortic valve surgery simulation: a review. *Fluids*, vol. 8, no. 11, 295. <https://doi.org/10.3390/fluids8110295>
18. Pfaller M. R., Pham J., Verma A., Pegolotti L., Wilson N. M., ... & Marsden A. L. (2022) Automated generation of 0D and 1D reduced-order models of patient-specific blood flow. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, vol. 38, no. 10, e3639. <https://doi.org/10.1002/cnm.3639>
19. Zingaro A., Fumagalli I., Dede L., Fedele M., Africa P. C., ... & Quarteroni A. (2022) A geometric multiscale model for the numerical simulation of blood flow in the human left heart. *Discrete and Continuous Dynamical Systems – Series S*, vol. 15, no. 8, pp. 2391–2427. <https://doi.org/10.3934/dcdss.2022052>
20. Fedenko S., Volosheniuk T., & Rizak H. (2024) Analiz vplyvu innovatsiinykh tekhnolohii na rozvytok farmatsevtichnoho rynku v Ukraini. [Analysis of the impact of innovative technologies on the development of the pharmaceutical market in Ukraine]. *Suchasna medytsyna, farmatsiia ta psykhologichne zdorovia*, vol. 2, no. 16, pp. 106–110. <https://doi.org/10.32689/2663-0672-2024-2-17>
21. Hradil H. I., Hubina-Vakulyk H. I., Yurko K. V., Nartov P. V., Lukashova O. P., & Khalusheva Yu. B. (2023) COVID-19, pandemichnyi hryp A(H1N1): Klinichni ta patoloanatomichni porivniannia. [COVID-19, pandemic influenza A(H1N1): Clinical and pathoanatomical comparisons]. *Infektsiini khvoroby*, no. 3, pp. 15–27. <https://doi.org/10.11603/1681-2727.2023.3.14197>

Дата першого надходження статті до видання: 14.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

С. О. ПРИМИСЬКА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-5832-0686

В. М. КУЛІКОВ

кандидат технічних наук, доцент
Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-1015-5802

О. О. БАЗИЛЬ

кандидат фізико-математичних наук,
старший викладач кафедри комп'ютерних наук
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0002-2644-5361

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ У ХМАРНИХ ІНФРАСТРУКТУРАХ

У сучасному світі хмарні інфраструктури стали невіддільною частиною бізнес-процесів, що зумовлює необхідність забезпечення їхньої безперервності та стійкості. В умовах швидкого розвитку технологій штучного інтелекту (далі – ШІ) виникає потреба їх застосування для прогнозування відмов у хмарних системах. Метою статті є дослідження різних моделей і методів ШІ, що застосовуються для прогнозування відмов, а також оцінка їхньої ефективності, переваг і викликів, які постають перед організаціями під час упровадження таких технологій. У дослідженні застосовано теоретичні (аналіз, синтез, абстрагування, індукція, дедукція) та емпіричні методи, зокрема опис. Застосування технологій ШІ для прогнозування відмов у хмарних інфраструктурах охоплює аналіз технічних збоїв, аномалій у продуктивності, кіберзагроз, відмов в обслуговуванні, порушень інтеграції та чинників, пов'язаних із людськими помилками, що дозволяє підвищити надійність систем за допомогою моделей і методів, таких як Random Forest, XGBoost, LSTM, GRU та технологій AIOps. У статті здійснено огляд різних моделей, а також методів прогнозування аналітики часових рядів та виявлення аномалій. Розглянуто AIOps-технології, які забезпечують автоматизацію процесів моніторингу та управління ризиками. Проаналізовано потенційні переваги впровадження ШІ в хмарних системах, зокрема підвищення точності прогнозування, можливість обробки великих обсягів даних і раннє виявлення аномалій. Водночас розглядаються й виклики, які постають перед організаціями, як-от потреба у великих наборах даних, висока обчислювальна вартість та ризики кібербезпеки. На основі аналізу надано практичні рекомендації для інтеграції технологій ШІ в процеси моніторингу та управління ризиками. Рекомендовано застосовувати цифрові двійники, моделі ШІ для раннього виявлення аномалій, графові нейронні мережі та MLOps-інструменти для автоматизації тестування хмарної інфраструктури. Це дасть змогу мінімізувати ризики, пов'язані з оновленням, і підвищити стійкість системи. Отже, застосування технологій ШІ для прогнозування відмов у хмарних інфраструктурах може значно підвищити їхню надійність і продуктивність, проте потребує ретельного планування та врахування можливих викликів.

Ключові слова: глибинне навчання, машинне навчання, виявлення аномалій, AIOps, MLOps, Random Forest, XGBoost, LSTM, GRU.

S. O. PRYMYSKA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Automation Hardware and Software Department
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-5832-0686



V. M. KULIKOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Institute of Special Communications and Information Protection
of National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-1015-5802

O. O. BAZYL

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Computer Science
Sumy State University
ORCID: 0000-0002-2644-5361

USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES TO PREDICT FAILURES IN CLOUD INFRASTRUCTURES

In the modern world, cloud infrastructures have become an integral part of business processes, which necessitates the need to ensure their continuity and stability. In the context of the rapid development of artificial intelligence (hereinafter referred to as AI), there is a need to use them to predict failures in cloud systems. The purpose of the article is to study various AI models and methods used for predicting failures, as well as to assess their effectiveness, advantages and challenges that organizations face when implementing such technologies. The study uses theoretical (analysis, synthesis, abstraction, induction, deduction) and empirical methods, including description. The use of AI technologies to predict failures in cloud infrastructures includes analysis of technical failures, performance anomalies, cyber threats, service failures, integration issues, and human error factors, which helps improve system reliability using models and methods such as Random Forest, XGBoost, LSTM, GRU, and AIOps technologies. The article reviews various models and methods for predictive time series analytics and anomaly detection. It examines AIOps technologies that automate monitoring and risk management processes. It analyzes the potential benefits of implementing AI in cloud systems, including improved forecasting accuracy, the ability to process large amounts of data, and early detection of anomalies. At the same time, it also examines the challenges facing organizations, such as the need for large data sets, high computational costs, and cybersecurity risks. Based on the analysis, practical recommendations are provided for integrating AI technologies into monitoring and risk management processes. It is recommended to use digital twins, AI models for early anomaly detection, graph neural networks, and MLOps tools to automate testing of cloud infrastructure. This will minimize the risks associated with updates and increase the resilience of the system. Therefore, the use of AI technologies for failure prediction in cloud infrastructures can significantly increase their reliability and performance, but requires careful planning and consideration of possible challenges.

Key words: deep learning, machine learning, anomaly detection, AIOps, MLOps, Random Forest, XGBoost, LSTM, GRU.

Постановка проблеми

Сучасні хмарні інфраструктури є невіддільною частиною інформаційних технологій, забезпечуючи організаціям гнучкість, масштабованість та ефективне управління ресурсами. Проте зростання залежності від хмарних рішень підвищує ризик виникнення відмов, які можуть призвести до фінансових збитків, втрати інформації та зниження довіри користувачів. У цьому контексті своєчасне виявлення та прогнозування можливих проблем є важливим для забезпечення стійкості та безперебійності бізнес-процесів.

Сучасні методи моніторингу та управління хмарними інфраструктурами нерідко виявляються недостатньо дієвими для своєчасного реагування на потенційні загрози. Використання статичних правил чи простих алгоритмів не забезпечує належної чутливості до динаміки процесів, унаслідок чого підвищується ризик раптових відмов. З огляду на це, постає потреба застосування більш адаптивних технологій, здатних прогнозувати критичні стани на основі аналізу великих масивів даних.

У цьому контексті технології ШІ відкривають нові можливості для розв’язання зазначених проблем. Алгоритми машинного навчання (далі – МН) та глибокого навчання (далі – ГН) здатні аналізувати історичні дані про роботу системи, виявляти патерни та аномалії, що можуть свідчити про потенційні відмови. Це не лише підвищує точність прогнозування, але й автоматизує процеси моніторингу та управління ризиками, що є важливим аспектом для підтримки стабільності хмарних інфраструктур.

Актуальність дослідження зумовлена стрімким розвитком інформаційних технологій і зростанням обсягів даних, що обробляються в хмарних системах, унаслідок чого традиційні підходи до управління вже не забезпечують належної ефективності. Інтеграція технологій ШІ в процеси прогнозування відмов дає змогу підвищити надійність хмарних інфраструктур, скоротити витрати на їхнє обслуговування та зміцнити загальний рівень безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Хмарні технології активно розвиваються, що посилює потребу в ефективному моніторингу та управлінні ризиками. Аналіз сучасних досліджень дає змогу виявити наявні прогалини та формує підґрунтя для подальших наукових розробок. Так, Ф. Воутсас (F. Voutsas), Х. Біолос (J. Violos), А. Лівадіас (A. Leivadeas) представляють механізм подолання надмірності сповіщень у моніторингу хмарних інфраструктур на основі методів машинного навчання. Запропонована система фільтрує нерелевантні події, підвищуючи точність реагування адміністраторів на понад 90 %. Використання реальних даних компанії Netdata підкреслює практичну цінність дослідження [1].

Стратегії оцінки та мінімізації ризиків у хмарних середовищах розглядають О. Агбула та колеги (O. Agboola et al.), підкреслюючи роль інноваційних технологій (ШІ, Zero Trust моделей, автоматизації відповідності вимогам) у забезпеченні стійкості хмарних інфраструктур до сучасних загроз [2].

Управління ризиками хмарної безпеки в контексті Індустрії 4.0 аналізують С. Дріс (S. Drissi), М. Шарджі (M. Chergui), З. Хатер (Z. Khatar), акцентуючи на важливості застосування ШІ та МН для виявлення загроз і необхідності адаптивних моделей управління ризиками для складних хмарних середовищ [3].

На ролі даних і методів МН у хмарних та туманних обчисленнях наголошує Ю. Козак, розглядаючи специфіку fog-платформ, їхні сценарії та підходи до прогнозування, зокрема статистичні моделі, дерева рішень та нейронні мережі (далі – НМ) [4].

Вплив нейронних мереж на кібербезпеку досліджують О. Кушнерьов, І. Позовна, В. Сокол. Автори зазначають, що НМ здатні автоматизувати виявлення загроз та ефективно інтегруватися з сучасними технологіями безпеки [5].

Значення ШІ та МН для оптимізації DevOps-процесів підкреслюють О. Дуда, І. Шаклейна, М. Лучкевич. Науковці вивчають проблеми традиційних підходів, можливості аналізу логів, прогнозування технічних перешкод і перспективи створення автономних DevOps-агентів [6].

Трансформацію кібербезпеки США під впливом ШІ аналізують А. Адевус та співавтори (A. O. Adewus et al.), висвітлюючи переваги ШІ в захисті важливих національних систем та акцентуючи на етичних і регуляторних аспектах його впровадження [7].

Застосування систем ШІ для підвищення продуктивності та адаптивності систем безпеки досліджують І. Буров (Y. Burov), І. Жовнір (Y. Zhovnir), О. Захарія (O. Zakharya). Запропонована ними система ситуаційно-орієнтованої обробки інцидентів у реальному часі використовує онтологію GFO та базу знань зі сценаріями типових загроз, що важливо для хмарних інфраструктур [8].

На значенні ШІ в кібербезпеці в умовах Четвертої промислової революції наголошують І. Саркер (I. Sarker), М. Фурхад (M. Furhad), Р. Новроз (R. Nowrozy). Науковці визначають роль МН, гібридних моделей, NLP та експертних систем в автоматизації захисту та протидії кібератакам [9].

На прогнозуванні навантаження хмарних ресурсів за допомогою нейронних мереж зосереджуються В. Давидов (V. Davydov) та Д. Гребенюк (D. Hrebeniuk). Експерименти підтверджують можливість значного підвищення ефективності використання ресурсів через удосконалені моделі прогнозування [10].

Загалом, аналіз літератури демонструє швидкий розвиток досліджень, присвячених застосуванню ШІ для прогнозування відмов та збереження безпеки в хмарних системах. Інтеграція інтелектуальних технологій дає змогу підвищувати ефективність, але залишається низка викликів, зокрема якість даних, стандартизація та складність системної інтеграції. Поточне дослідження спрямоване на подолання цих проблем шляхом розроблення нових підходів, що покращать точність прогнозування та знизять ризики для організацій, які застосовують хмарні технології.

Формулювання мети дослідження

Мета статті – дослідити застосування технологій ШІ для прогнозування відмов у хмарних інфраструктурах, оцінити їхню ефективність, переваги та виклики, що виникають під час впровадження таких технологій в організації; розробити практичні рекомендації для інтеграції ШІ в процеси моніторингу та управління ризиками, щоб забезпечити безперебійність і стійкість роботи хмарних систем.

Завдання роботи:

1) дослідити різні моделі та методи ШІ для прогнозування відмов, зосереджуючись на їхній ефективності та застосуванні в контексті хмарних технологій;

2) проаналізувати потенційні переваги (зокрема, підвищення точності прогнозування, зниження операційних витрат та покращення загальної продуктивності систем) та виклики, що постають перед організаціями під час впровадження таких технологій;

3) розробити практичні рекомендації для організацій щодо інтеграції технологій ШІ в процеси моніторингу та управління ризиками для забезпечення стійкості та безперебійності функціонування хмарних систем.

Викладення основного матеріалу дослідження

Прогнозування відмов у хмарних інфраструктурах – важливе завдання для мінімізації ризиків, пов'язаних із простим систем, та підвищення їхньої надійності. Для досягнення цієї мети застосовуються різні технології ШІ, серед яких основними є МН, НМ та аналіз даних. Огляд технологій ШІ для прогнозування відмов у хмарних інфраструктурах наведено в таблиці 1.

У табл. 1 представлено різні категорії технологій ШІ, які застосовуються для прогнозування відмов у хмарних інфраструктурах. Кожна категорія містить специфічні методи та моделі, а також їхні характеристики, що демонструє важливість цих технологій для підвищення надійності систем. У категорії МН представлено такі моделі, як Random Forest, XGBoost, LightGBM, SVM, KNN, Naive Bayes і логістична регресія. Ці методи здатні аналізувати історичні дані для прогнозування відмов, що дає змогу класифікувати стани системи та оцінювати ризики [11, с. 20073; 12, с. 13]. Застосування МН у цьому контексті забезпечує проактивне виявлення потенційних проблем, що необхідно для підтримки безперебійності бізнес-процесів.

Таблиця 1

Технології ШІ для прогнозування відмов у хмарних інфраструктурах

Категорія технологій	Методи / моделі	Характеристика застосування
МН	Random Forest, XGBoost, LightGBM, SVM, KNN, Naive Bayes, Логістична регресія	Прогнозування відмов за історичними даними, класифікація станів системи, оцінка ризику
ГН	LSTM, GRU, CNN, Time Series Transformers, Autoencoders	Передбачення аномалій у часових рядах, виявлення прихованих патернів, раннє попередження збоїв
Прогностична аналітика часових рядів	ARIMA, SARIMA, Prophet, VAR	Прогноз навантаження, ресурсів, піків, трендів, деградації продуктивності
Виявлення аномалій	Isolation Forest, LOF, One-Class SVM, Gaussian Mixture Models, Reconstruction Error (Autoencoders)	Виявлення відхилень від нормальної поведінки, що передують відмові
Підкріплювальне навчання	Q-Learning, DQN, Policy Gradient Methods	Адаптивне масштабування, автоматичне реагування, мінімізація ризику збоїв
Аналіз логів і подій	LogBERT, LogGPT, BERT for Logs, Seq2Seq, K-Means, DBSCAN	Виявлення аномальних подій у логах, прогноз наступних лог-записів, кореляція подій
Графові нейронні мережі	GCN, GraphSAGE, GAT	Прогноз каскадних відмов, аналіз взаємозалежностей у мікросервісах, побудова графів доступності
Платформи та фреймворки ШІ/МН для хмари	AWS AI/CloudWatch, Azure ML, Vertex AI, Prometheus ML, KubeFlow, Dynatrace Davis AI, Datadog AIOps	Готові інструменти для моніторингу, прогнозування відмов, автоматизації операцій
AIOps-технології	Moogsoft, BigPanda, IBM Watson AIOps, Splunk ITSI, Dynatrace AI Engine	Автоматична кореляція подій, прогноз інцидентів, аналіз причин відмов, усунення збоїв

Джерело: створено автором на основі [11, с. 20073; 12, с. 13; 13, с. 262; 14, с. 3942; 15, с. 747; 16, с. 104; 17, с. 6]

ГН, представлене моделями LSTM, GRU, CNN, Time Series Transformers і Autoencoders, має значний потенціал у прогнозуванні аномалій у часових рядах. Ці моделі можуть виявляти приховані патерни в даних, що сприяє ранньому запобіганню порушень [13, с. 262]. Застосування ГН дає змогу системам адаптуватися до динамічних змін навантаження та умов експлуатації, що підвищує їхню загальну надійність.

Методи прогностичної аналітики часових рядів, такі як ARIMA, SARIMA, Prophet і VAR, застосовуються для прогнозування навантаження, використання ресурсів та пікових значень [14, с. 3942]. Вони дають змогу аналізувати тренди й деградацію продуктивності, що є важливими аспектами для управління ресурсами у хмарних інфраструктурах. Прогнозування на основі часових рядів забезпечує проактивний підхід до управління ризиками.

Виявлення аномалій – категорія, що охоплює методи Isolation Forest, LOF, One-Class SVM і Gaussian Mixture Models. Ці моделі допомагають виявляти відхилення від нормальної поведінки системи, які свідчать про наближення відмов. Завдяки цим технологіям можна оперативно реагувати на потенційні загрози, що знижує ймовірність виникнення серйозних проблем.

Підкріплювальне навчання, представлене такими методами, як Q-Learning, DQN і Policy Gradient Methods, застосовується для автоматичного адаптивного масштабування ресурсів та реагування на зміни навантаження. Цей підхід дає змогу мінімізувати ризик порушень шляхом самонавчання системи на основі отриманого досвіду [15, с. 747]. Відповідно, підкріплювальне навчання сприяє створенню більш стійких і адаптивних хмарних інфраструктур.

Аналіз логів і подій передбачає застосування таких моделей, як LogBERT, LogGPT і BERT for Logs. Ці технології дають змогу виявляти аномальні події в логах та прогнозувати послідовність лог-записів. Кореляція подій – важливий аспект цього процесу, оскільки вона допомагає встановити першопричини потенційних збоїв та оптимізувати моніторинг системи.

Графові нейронні мережі (GCN, GraphSAGE, GAT) пропонують нові можливості для прогнозування каскадних відмов та аналізу взаємозалежностей між мікросервісами. Побудова графів доступності допомагає візуалізувати та аналізувати складні зв'язки в системах, що може бути корисним для виявлення вузьких місць в архітектурі.

На ринку існує низка платформ та фреймворків для реалізації ШІ/МН у хмарному середовищі, таких як AWS AI/CloudWatch, Azure ML та Vertex AI. Ці інструменти надають готові рішення для моніторингу та прогнозування порушень, що спрощує процес інтеграції ШІ в бізнес-процеси [16, с. 104].

AIOps-технології (Moogsoft, BigPanda, IBM Watson AIOps) забезпечують автоматичну кореляцію подій та прогнозування інцидентів. Застосування цих технологій дає змогу аналізувати першопричини відмов та ефективно

їх усувати. Завдяки AIOps організації можуть значно підвищити свою оперативність і скоротити середній час до відновлення [17, с. 6].

Аналіз технологій ІІІ для прогнозування відмов у хмарних інфраструктурах демонструє їхню важливу роль у забезпеченні надійності та ефективності систем. Кожна категорія технологій має специфічні методи та моделі, які взаємодоповнюють одна одну у створенні інтегрованого підходу до управління ризиками. Застосування цих технологій не лише знижує ймовірність відмов, а й оптимізує управління ресурсами в умовах постійно змінюваного навантаження.

У табл. 2 наведено переваги й обмеження застосування ІІІ для прогнозування відмов у хмарних інфраструктурах.

Таблиця 2

Переваги та обмеження застосування ІІІ для прогнозування відмов у хмарних інфраструктурах

Переваги	Обмеження
Висока точність прогнозування	Висока потреба у великих наборах даних
Можливість обробки великих обсягів телеметрії та логів	Висока обчислювальна вартість
Адаптивність до змін середовища	Необхідність спеціалістів із МН/ІІІ
Раннє виявлення аномалій	Можливі хибні спрацювання
Автоматизація операцій	Складність інтеграції з наявною хмарною інфраструктурою
Підвищення надійності та доступності сервісів	Вразливість моделей до «drift»
Зменшення впливу людського чинника	Ризики кібербезпеки
Оптимізація витрат на інфраструктуру	Неоднорідність даних різних мікросервісів

Джерело: створено автором на основі [18, с. 104; 19, с. 503]

Застосування ІІІ для прогнозування відмов у хмарних інфраструктурах має значні переваги, які роблять його привабливим для багатьох організацій. Насамперед моделі МН та ГН демонструють високу точність прогнозування, оскільки здатні виявляти приховані закономірності в даних, які часто залишаються непоміченими традиційними методами. Це дає змогу ефективніше реагувати на потенційні проблеми проактивно.

Крім того, ІІІ здатен обробляти значні обсяги телеметрії та логів у режимі реального часу, що важливо в сучасному середовищі з мільйонами метрик і подій. Адаптивність моделей до змін у навантаженні або топології хмари також є перевагою, оскільки це дає змогу системам швидко реагувати на динамічні умови.

Одним зі значущих аспектів застосування ІІІ є раннє виявлення аномалій, що може запобігти каскадним відмовам та серйозним інцидентам. Автоматизація операцій, зокрема через AIOps, дає змогу системам самостійно аналізувати інциденти, корелювати події та визначати першопричини проблем. Це підвищує надійність і доступність сервісів, адже прогностичні моделі забезпечують своєчасне масштабування та оптимізацію ресурсів [18, с. 104].

Проте, попри численні переваги, існують і значні обмеження, які потребують уваги. Зокрема, високі вимоги до великих наборів даних можуть стати перешкодою для ефективного навчання моделей. Це підкреслює необхідність якісних історичних даних про роботу хмарної системи. Також варто зазначити, що навчання складних моделей, таких як LSTM або Transformers, вимагає значних обчислювальних ресурсів, що може призводити до високих фінансових витрат [19, с. 503].

Важливим аспектом є потреба у кваліфікованих спеціалістах із МН та AIOps для інтеграції цих технологій. Без відповідних знань і досвіду реалізація може бути складною. Крім того, можливі хибноопозитивні спрацювання під час неправильного навчання або недостатньої кількості даних можуть призвести до негативних наслідків.

Складність інтеграції нових технологій із наявною хмарною інфраструктурою також може викликати труднощі, особливо якщо система нестандартизована. Моделі втрачають точність із часом через дрейф даних (drift), що вимагатиме регулярного перенавчання. Ризики кібербезпеки, пов'язані з маніпуляціями вхідними даними для обману моделей прогнозування, є ще одним серйозним викликом.

До того ж неоднорідність даних між мікросервісами може ускладнити створення універсальної моделі, що підкреслює важливість адаптації підходів до конкретних умов. Таким чином, хоча застосування ІІІ для прогнозування відмов у хмарних інфраструктурах має значні переваги, необхідно враховувати потенційні недоліки та обмеження цієї технології.

Цей контекст відкриває нові можливості для впровадження інноваційних рішень, які можуть допомогти подолати ці виклики. Одним із таких є інтеграція цифрових двійників хмарної інфраструктури, що дає змогу створити керовану ІІІ віртуальну копію середовища для тестування ризиків, сценаріїв відмов та оновлень. Такий підхід гарантує безпечне прогнозування проблем, не впливаючи на продуктивне середовище, і допомагає виявити вузькі місця системи.

Цифрові двійники можуть використовуватися для симуляції різних сценаріїв навантаження та тестування реакції системи на них. Це дає змогу не лише виявити потенційні точки відмови, але й оптимізувати конфігурацію

системи для підвищення її стійкості. Завдяки такій інтеграції, організації можуть швидше адаптуватися до змін у навантаженні та знизити ризики, пов'язані з оновленнями або змінами в налаштуваннях.

Крім того, необхідно розглянути практичні рекомендації для впровадження ШІ в моніторинг і управління ризиками хмарних систем. Наприклад, застосування аналітики даних у реальному часі може допомогти виявляти аномалії та реагувати на них ще до того, як вони спричинять серйозні проблеми. Поєднання цих технологій із традиційними методами моніторингу може значно підвищити загальну ефективність управління ризиками.

Наступним кроком є запровадження механізмів самовідновлення. Застосування моделей ШІ, які самостійно виявляють аномальну поведінку, дає змогу автоматично ініціювати відновлення, наприклад, міграцію віртуальних машин чи перезапуск сервісів. Це скорочує час простою та мінімізує необхідність ручного втручання.

Генеративні моделі, такі як GPT, також можуть бути корисними для аналізу логів. Вони генерують гіпотези щодо причин збоїв, описують сценарії ризику та пропонують варіанти їхнього усунення [20, с. 3]. Це прискорює процес аналізу кореневих причин інцидентів і забезпечує швидке реагування.

До того ж упровадження поведінкового профілю ресурсів дає змогу створити модель поведінки кожного сервісу на основі ШІ-аналітики, що сприяє виявленню навіть незначних відхилень від норми, які можуть передувати збоям. Використання графових нейронних мереж для моделювання каскадних відмов також є перспективним рішенням. Аналіз залежностей між сервісами у формі графа допомагає прогнозувати каскадні збої заздалегідь, що сприяє запобіганню масовим інцидентам і покращує планування резервування.

ШІ-орієнтоване тестування стійкості є ще одним важливим аспектом. Автоматичне генерування інтелектуальних порушень допомагає системам навчатися на реальних сценаріях, підвищуючи їхню стійкість і здатність до самовідновлення.

Створення системи колективного інтелекту сервісів через федеративне навчання дає змогу поєднувати локальні моделі без обміну сирими даними. Це підвищує точність прогнозування у великих розподілених хмарах та гарантує більшу безпеку даних.

Упровадження ШІ-прогнозування енергоефективності та навантаження є серйозним кроком у зменшенні ризику фізичних відмов обладнання. Це рішення передбачає поєднання прогнозу навантаження з оцінкою енергетичних ризиків, таких як перевантаження, перегрів та деградація обладнання. Завдяки такому інтегрованому підходу можна не лише оптимізувати витрати, а й стабілізувати роботу системи.

Реалізація превентивного масштабування на основі ШІ забезпечує можливість передбачати піки навантаження за кілька хвилин або годин до їхнього виникнення. Це дає змогу завчасно масштабувати ресурси, що значно знижує ймовірність падіння сервісів у критичні моменти.

Наступним етапом є автоматичне оцінювання ризику для кожного мікросервісу. Використовуючи історичні дані про інциденти, залежності та навантаження, модель може оцінювати рівень ризику збою в діапазоні від 0 до 100 %. Це забезпечує миттєву пріоритизацію компонентів системи, що є надзвичайно важливим для оперативного реагування на можливі загрози.

ШІ також може створювати теплові карти аномалій, які візуалізують проблемні зони в хмарній інфраструктурі. Це дає змогу швидко діагностувати проблемні компоненти та визначати зони ризику, що підвищує загальну ефективність моніторингу системи.

Важливою також є інтеграція моделей прогнозування в DevOps-цикли через MLOps-based CI/CD. Під час кожного релізу автоматично тестується вплив змін на ризик відмов, і моделі оновлюються [21, с. 456]. Це істотно зменшує кількість інцидентів після оновлень і забезпечує стабільні релізи.

Завершальним етапом є застосування ШІ для симуляції критичного навантаження. ШІ генерує навантаження, яке імітує реальні умови, що дає змогу перевірити стійкість системи до непередбачуваних піків і зовнішніх чинників. Таким чином, інтеграція цих технологій створює надійнішу та ефективнішу хмарну інфраструктуру, готову до викликів сучасності.

Отже, застосування технологій ШІ для прогнозування відмов у хмарних інфраструктурах відкриває нові можливості для підвищення надійності та продуктивності систем. Кожен із підходів має свої особливості, переваги й недоліки, тому вибір конкретного методу залежить від специфіки завдання та доступних даних.

Висновки

У результаті дослідження детально проаналізовано різні моделі та методи ШІ, які застосовуються для прогнозування відмов у хмарних інфраструктурах. Зокрема, розглянуто алгоритми, такі як Random Forest, XGBoost, LSTM та графові нейронні мережі, які продемонстрували високу ефективність в аналізі великих обсягів даних та виявленні аномалій. Це дає змогу організаціям підвищити точність прогнозування та знизити операційні витрати, що важливо в сучасному бізнес-середовищі.

Аналіз технічних збоїв, відхилень у продуктивності, кіберзагроз, проблем обслуговування, інтеграційних порушень та помилок, пов'язаних із людським фактором, засвідчив наявність різних типів відмов у хмарних інфраструктурах. Зокрема, технічні збої охоплюють апаратні й програмні порушення, що можуть спричиняти втрату даних або зупинку системи. Відхилення продуктивності відображають нетипові зміни в роботі інфраструктури

та сигналізують про потенційні порушення. Кіберзагрози стосуються атак на систему, таких як DDoS-атаки та фішинг. Проблеми обслуговування виникають у разі недостатньої технічної підтримки або труднощів із наданням послуг. Інтеграційні помилки виникають під час впровадження нових технологій у вже наявну інфраструктуру, а помилки людського походження виникають через неправильні дії чи недогляд персоналу.

Разом із перевагами впровадження технологій ІІІ дослідження також окреслило низку викликів. До них належать необхідність у великих наборах даних, висока обчислювальна вартість та ризики кібербезпеки. Ці чинники можуть стати перешкодою для організацій, які прагнуть інтегрувати такі технології. Важливо враховувати ці обмеження під час планування впровадження ІІІ у хмарні системи.

Наукова новизна дослідження полягає в систематизації та порівняльному аналізі наявних методів і моделей ІІІ для прогнозування відмов у хмарних інфраструктурах та в розробленні практичних рекомендацій щодо їхньої інтеграції.

Перспективи подальших досліджень можуть охоплювати поглиблене вивчення впливу нових технологій, зокрема федеративного навчання та AIOps, на підвищення надійності хмарних систем. Важливим напрямом є також аналіз можливостей адаптації моделей до змін середовища та зміцнення їхньої стійкості до дрейфу даних (drift), що сприятиме підвищенню ефективності прогнозування відмов. Крім того, перспективним напрямом є вивчення питань інтеграції технологій ІІІ з методами автоматизованого управління ресурсами, що відкриває можливість формування високодинамічних та адаптивних систем моніторингу й керування хмарними інфраструктурами.

Список використаної літератури

1. Voutsas F., Violos J., Leivadreas A. Mitigating alert fatigue in cloud monitoring systems: A machine learning perspective. *Computer Networks*. 2024. Vol. 250. Article 110543. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110543>
2. Agboola O. A., Ogeawuchi J. C., Gbenle T. P., Abayomi A. A., Uzoka A. C. Advances in risk assessment and mitigation for complex cloud-based project environments. *Journal of Frontiers in Multidisciplinary Research*. 2023. Vol. 06, № 01. P. 309–320. DOI: <https://doi.org/10.54660/jfmr.2023.4.1.309-320>
3. Drissi S., Chergui M., Khatar Z. A systematic literature review on risk assessment in cloud computing: Recent research advancements. *IEEE Access*. 2025. № 13. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2025.3561123>
4. Козак Ю. Б. Аналіз даних та машинне навчання на хмарних та туманних платформах як основа ефективної передачі даних. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Т. 32 (71), № 5. С. 100–107. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/16>
5. Кушнерьов О. С., Позовна І. В., Сокол В. Вплив нейронних мереж на розвиток кібербезпеки в умовах регуляторних змін. *Безпека інформації*. 2024. Т. 30, № 2. С. 261–269. DOI: <https://doi.org/10.18372/2225-5036.30.19238>
6. Duda O., Shakleina I., Luchkevych M. Increasing the efficiency of DevOps through the use of artificial intelligence and machine learning. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2025. Vol. 351, № 3(1). P. 143–149. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-17>
7. Adewusi A. O., Okoli U. I., Olorunsogo T., Adaga E., Daraojimba D. O., Obi O. C. Artificial intelligence in cybersecurity: Protecting national infrastructure: A USA review. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2024. Vol. 21, № 1. P. 2263–2275. DOI: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.0313>
8. Burov Y., Zhovnir Y., Zakharya O. The vision and implementation of intelligent security system. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2024. Т. 341, № 5. P. 497–509. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-72>
9. Sarker I. H., Furhad M. H., Nowrozy R. AI-driven cybersecurity: An overview, security intelligence modeling and research directions. *SN Computer Science*. 2021. Vol. 2. Article 173. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00557-0>
10. Davydov V., Hrebeniuk D. Development the resources load variation forecasting method within cloud computing systems. *Advanced Information Systems*. 2020. Vol. 4, № 4. P. 128–135. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.18>
11. Ahmed S. A., Khalifa E. H., Nawaz M., Abdalla F. A., Mahmoud A. F. A. Enhancing cloud data center security through deep learning: A comparative analysis of RNN, CNN, and LSTM models for anomaly and intrusion detection. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2025. Vol. 15, № 1. P. 20071–20076. DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.9445>
12. Tengku Asmawi T. N., Ismail A., Shen J. Cloud failure prediction based on traditional machine learning and deep learning. *Journal of cloud computing*. 2022. Vol. 11. Article 47. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00327-0>
13. Noor A. Cloud-based deep learning for real-time URL anomaly detection: LSTM/GRU and CNN/LSTM models. *Computer systems science and engineering*. 2025. № 49. P. 259–286. DOI: <https://doi.org/10.32604/csse.2025.060387>
14. Saha S., Sarkar J., Dhavala S., Mota P., Sarkar S. Quantile-long short term memory: A robust, time series anomaly detection method. *IEEE transactions on artificial intelligence*. 2024. Vol. 5, № 8. P. 3939–3950. DOI: <https://doi.org/10.1109/tai.2024.3353163>
15. Zhao Z., Xu C., Li B. A LSTM-based anomaly detection model for log analysis. *Journal of signal processing systems*. 2021. Vol. 93. P. 745–751. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11265-021-01644-4>

16. Shaikh R., Muntean C. H., Gupta S. Prediction of resource utilisation in cloud computing using machine learning. *Proceedings of the 14th International Conference on Cloud Computing and Services Science CLOSER*. 2024. Vol. 1. P. 103–114. DOI: <https://doi.org/10.5220/0012742200003711>
17. Al-Ghuwairi A. R., Sharrah Y., Al-Fraihat D., AlElaimat M., Alsarhan A., Algarni A. Intrusion detection in cloud computing based on time series anomalies utilizing machine learning. *Journal of cloud computing*. 2023. Vol. 12. Article 127. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13677-023-00491-x>
18. Dmytriv Y., Orlov M. Use of artificial intelligence methods and tools in the construction of cloud IT infrastructures. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія Інформаційні системи та мережі*. 2025. Вип. 17. С. 101–113. DOI: <https://doi.org/10.23939/sisn2025.17.101>
19. Іванченко Ю., Аверичев І., Рижаков М. Узагальнена модель прогнозування та виявлення аномалій кібербезпеки на основі штучного інтелекту. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2025. № 4(28). С. 493–510. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.28.823>
20. Трапаїдзе С., Швецова К. Генеративний штучний інтелект у створенні маркетингового контенту для українських компаній. *Економіка та суспільство*. 2025. № 72. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-72-161>
21. Pravorska N. Method of applying machine learning to enhance the efficiency of DevOps processes. *Herald of Khmelnytskyi National University, Technical sciences*. 2024. Vol. 343, № 6(1). P. 454–463. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-68>

References

1. Voutsas, F., Violos, J., & Leivadreas, A. (2024). Mitigating alert fatigue in cloud monitoring systems: A machine learning perspective. *Computer Networks*, 250, Article 110543. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110543>
2. Agboola, O. A., Ogeawuchi, J. C., Gbenle, T. P., Abayomi, A. A., & Uzoka, A. C. (2023). Advances in risk assessment and mitigation for complex cloud-based project environments. *Journal of Frontiers in Multidisciplinary Research*, 06(01), 309–320. <https://doi.org/10.54660/jfmr.2023.4.1.309-320>
3. Drissi, S., Chergui, M., & Khatar, Z. (2025). A systematic literature review on risk assessment in cloud computing: Recent research advancements. *IEEE Access*, 13. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3561123>
4. Kozak, Yu. B. (2021). Analiz danykh ta mashynne navchannia na khmarnykh ta tumannykh platformakh yak osnova efektyvnoi peredachi danykh [Data analysis and machine learning on cloud and fog platforms as a basis for efficient data transmission]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky* [Scientific notes of TNU named after V.I. Vernadsky. Series: Technical Sciences], 32(71), no. 5, 100–107. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/16> (in Ukrainian).
5. Kushnerov, O. S., Pozovna, I. V., & Sokol, V. (2024). Vplyv neironnykh merezh na rozvytok kiberbezpeky v umovakh rehuliatornykh zmin [Impact of neural networks on cybersecurity development in the context of regulatory changes]. *Bezpeka informatsii* [Information security], 30(2), 261–269. <https://doi.org/10.18372/2225-5036.30.19238> (in Ukrainian).
6. Duda, O., Shackleina, I., & Luchkevych, M. (2025). Increasing the efficiency of DevOps through the use of artificial intelligence and machine learning. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 351, no. 3(1), 143–149. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-17>
7. Adewusi, A. O., Okoli, U. I., Olorunsogo, T., Adaga, E., Daraojimba, D. O., & Obi, O. C. (2024). Artificial intelligence in cybersecurity: Protecting national infrastructure: A USA review. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(1), 2263–2275. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.0313>
8. Burov, Y., Zhovnir, Y., & Zakharya, O. (2024). The vision and implementation of intelligent security system. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 341, no. 5, 497–509. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-72>
9. Sarker, I. H., Furhad, M. H., & Nowrozy, R. (2021). AI-driven cybersecurity: An overview, security intelligence modeling and research directions. *SN Computer Science*, 2, Article 173. <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00557-0>
10. Davydov, V., & Hrebeniuk, D. (2020). Development the resources load variation forecasting method within cloud computing systems. *Advanced Information Systems*, 4(4), 128–135. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.18>
11. Ahmed, S. A., Khalifa, E. H., Nawaz, M., Abdalla, F. A., & Mahmoud, A. F. A. (2025). Enhancing cloud data center security through deep learning: A comparative analysis of RNN, CNN, and LSTM models for anomaly and intrusion detection. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(1), 20071–20076. <https://doi.org/10.48084/etasr.9445>
12. Tengku Asmawi, T. N., Ismail, A., & Shen, J. (2022). Cloud failure prediction based on traditional machine learning and deep learning. *Journal of Cloud Computing*, 11, Article 47. <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00327-0>
13. Noor, A. (2025). Cloud-based deep learning for real-time URL anomaly detection: LSTM/GRU and CNN/LSTM models. *Computer Systems Science and Engineering*, 49, 259–286. <https://doi.org/10.32604/csse.2025.060387>

14. Saha, S., Sarkar, J., Dhavala, S., Mota, P., & Sarkar, S. (2024). Quantile-long short term memory: A robust, time series anomaly detection method. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 5(8), 3939–3950. <https://doi.org/10.1109/tai.2024.3353163>
15. Zhao, Z., Xu, C., & Li, B. (2021). A LSTM-based anomaly detection model for log analysis. *Journal of Signal Processing Systems*, 93, 745–751. <https://doi.org/10.1007/s11265-021-01644-4>
16. Shaikh, R., Muntean, C. H., & Gupta, S. (2024). Prediction of resource utilisation in cloud computing using machine learning. *Proceedings of the 14th International Conference on Cloud Computing and Services Science CLOSER*, 1, 103–114. <https://doi.org/10.5220/0012742200003711>
17. Al-Ghuwairi, A. R., Sharrah, Y., Al-Fraihat, D., AlElaimat, M., Alsarhan, A., & Algarni, A. (2023). Intrusion detection in cloud computing based on time series anomalies utilizing machine learning. *Journal of Cloud Computing*, 12, Article 127. <https://doi.org/10.1186/s13677-023-00491-x>
18. Dmytriv, Y., & Orlov, M. (2025). Use of artificial intelligence methods and tools in the construction of cloud IT infrastructures. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politehnika". Seriya Informatsiini systemy ta merezhi* [Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series Information Systems and Networks], 17, 101–113. <https://doi.org/10.23939/sisn2025.17.101>
19. Ivanchenko, Yu., Averychev, I., & Ryzhakov, M. (2025). Uzahalnena model prohnozuvannia ta vyivlennia anomalii kiberbezpeky na osnovi shtuchnoho intelektu [Generalized model for forecasting and detecting cybersecurity anomalies based on artificial intelligence]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika* [Cybersecurity: education, science, technology], no. 4(28), 493–510. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.28.823> (in Ukrainian).
20. Trapaidze, S., & Shvetsova, K. (2025). Heneratyvnyi shtuchnyi intelekt u stvorenni marketynhovoho kontentu dlia ukrain skykh kompanii [Generative artificial intelligence in creating marketing content for Ukrainian companies]. *Ekonomika ta suspilstvo* [Economy and society], no. 72. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-72-161> (in Ukrainian).
21. Pravorska, N. (2024). Method of applying machine learning to enhance the efficiency of DevOps processes. *Herald of Khmelnytskyi National University, Technical sciences*, 343, no. 6(1), 454–463. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-68>

Дата першого надходження статті до видання: 17.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

I. O. ROZLOMII

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Information Security
and Computer Engineering
Cherkasy State Technological University
ORCID: 0000-0001-5065-9004

V. H. BABENKO

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Information Security and Computer Engineering
Cherkasy State Technological University
ORCID: 0000-0003-2039-2841

V. M. ZAZHOMA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Civil Protection and Information Systems
National University of Civil Protection of Ukraine
ORCID: 0000-0003-2083-2472

ARCHITECTURE OF A MODULAR EXPERT SYSTEM FOR VERIFICATION OF SECURITY POLICIES IN MULTI-TIER INFORMATION ENVIRONMENTS

The article considers the problem of security policy verification in multi-level, distributed and dynamic information environments. The limitations of traditional centralized approaches are shown in the context of the increasing complexity of modern information systems and the number of interconnected policies. The feasibility of using modular expert systems to increase the flexibility, scalability and adaptability of security policy verification processes is substantiated. The emphasis is on the need for formalized policy representation and automated detection of conflicts and gaps in access rules. The proposed approach is focused on use in heterogeneous environments with a multi-level security control structure. The aim of this study is to develop an architecture for a modular expert system for verifying security policies in multi-level information environments. The research is based on the use of methods of formalization of security policies, logical analysis of access rules and modular design of expert systems. Experimental modeling and comparative analysis with existing solutions were used to evaluate the effectiveness of the proposed approach. An architectural model of an expert system with independent verification modules synchronized through a centralized controller is proposed. Experimental results confirm an increase in the speed of policy verification, improved scalability, and reduced knowledge update time compared to traditional approaches. The scientific novelty lies in the combination of a modular approach with a hierarchical model of the information environment for verifying security policies. The proposed architecture provides consistent verification of policies at different levels without interfering with the internal logic of individual modules. The results obtained confirm the effectiveness of the modular expert system for application in complex information environments. The proposed approach can be used as a basis for creating tools for automated control and analysis of security policies in critical information systems.

Key words: information security, expert system, policy verification, modular architecture, multi-tiered environment, access control.

I. O. РОЗЛОМІЙ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії
Черкаський державний технологічний університет
ORCID: 0000-0001-5065-9004

В. Г. БАБЕНКО

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії
Черкаський державний технологічний університет
ORCID: 0000-0003-2039-2841



В. М. ЗАЖОМА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри цивільного захисту та інформаційних технологій
Національний університет цивільного захисту України
ORCID: 0000-0003-2083-2472

АРХІТЕКТУРА МОДУЛЬНОЇ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВЕРИФІКАЦІЇ ПОЛІТИК БЕЗПЕКИ В БАГАТОРІВНЕВИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

У статті розглянуто проблему верифікації політик безпеки в умовах багаторівневих, розподілених та динамічних інформаційних середовищ. Показано обмеженість традиційних централізованих підходів у контексті зростання складності сучасних інформаційних систем і кількості взаємопов'язаних політик. Обґрунтовано доцільність застосування модульних експертних систем для підвищення гнучкості, масштабованості та адаптивності процесів перевірки політик безпеки. Акцент зроблено на необхідності формалізованого подання політик і автоматизованого виявлення конфліктів та прогалів у правилах доступу. Запропонований підхід орієнтований на використання в гетерогенних середовищах із багаторівневою структурою контролю безпеки. Метою дослідження є розробка архітектури модульної експертної системи для верифікації політик безпеки в багаторівневих інформаційних середовищах. Дослідження базується на використанні методів формалізації політик безпеки, логічного аналізу правил доступу та модульного проектування експертних систем. Для оцінювання ефективності запропонованого підходу застосовано експериментальне моделювання та порівняльний аналіз із наявними рішеннями. Запропоновано архітектурну модель експертної системи з незалежними модулями верифікації, синхронізованими через централізований контролер. Експериментальні результати підтвердили підвищення швидкості перевірки політик, покращення масштабованості та зменшення часу оновлення знань порівняно з традиційними підходами. Наукова новизна полягає у поєднанні модульного підходу з ієрархічною моделлю інформаційного середовища для верифікації політик безпеки. Запропонована архітектура забезпечує узгоджену перевірку політик на різних рівнях без втручання у внутрішню логіку окремих модулів. Отримані результати підтверджують ефективність модульної експертної системи для застосування в складних інформаційних середовищах. Запропонований підхід може бути використаний як основа для створення інструментів автоматизованого контролю та аналізу політик безпеки в критично важливих інформаційних системах.

Ключові слова: інформаційна безпека, експертна система, верифікація політик, модульна архітектура, багаторівневе середовище, контроль доступу.

Introduction

In modern information systems characterized by distribution, multi-level access and dynamically changing security policies, the issue of verifying compliance with these policies is becoming particularly relevant [1]. The growth of data volume, the complexity of interaction between subsystems of different levels of trust and the need to adapt to new threats require not only static, but also dynamic means of monitoring the implementation of security policies [2]. Classical methods that rely on manual verification or hard-coded rules are ineffective in the conditions of high variability and scale of modern information environments. At the same time, in the practical plane, the information security of organizations increasingly depends on the ability to timely detect violations of access policies, conflicts between security rules at different levels and hidden interdependencies that can lead to compromise of the system [3]. In this context, expert systems play a special role – tools that simulate the decision-making processes of a specialist in the field of information security [4]. However, traditional expert systems have limited flexibility, are poorly scalable, and often do not take into account the specifics of modular architectures and the context of multi-level interaction of components [5].

Thus, there is a need to create a new generation modular expert system capable of comprehensive verification of security policies, taking into account both logical dependencies between access rules and the context of decision execution in different information domains [6]. The relevance of the problem is also enhanced by the need to unify approaches to verifying compliance of policies with constantly updated security standards, with the possibility of flexible customization for specific organizational requirements.

Related works

The issue of security policy verification in complex information environments is considered in many scientific studies related to access control, formal policy models, expert systems and means of ensuring compliance with information security standards. Among the common approaches to formalizing security policies, it is worth noting the Bell-LaPadula, Biba, Clark-Wilson models, as well as Role-Based Access Control (RBAC), which laid the foundation for the development of access control mechanisms in systems with multi-level privileges [7–9]. However, these models do not provide sufficient flexibility to adapt to changes in the environment, dynamically redistribute roles and verify the correctness of the implementation of security rules in real time.

In recent years, the emphasis has shifted to dynamic access policies that take into account the context, history of user actions, behavioral patterns and external events. In this context, approaches based on Context-Aware Access

Control (CAAC) and Attribute-Based Access Control (ABAC) are actively developing. Formal methods for checking the consistency of security rules, algorithms for automatically detecting conflicts between policies, and mechanisms for their elimination are being developed. Special attention is paid to the use of logical and ontological models to describe complex dependencies between policies and their elements, as well as the use of fuzzy logic to account for uncertainties.

Expert systems in the field of information security are traditionally focused on incident diagnostics, vulnerability analysis, or recommendation generation [10]. At the same time, architectural aspects of modularity, ensuring scalability, and adapting the expert system to hierarchical levels of the information environment are often ignored. Existing implementations mostly do not allow for effective integration of new knowledge or policies without a complete revision of the rule system. This limits their application in heterogeneous environments with distributed decision-making points and a multitude of autonomous components.

Some scientific works suggest using a modular approach to building expert systems, where each module is responsible for a separate domain of knowledge or a subset of policies [11]. This approach makes it possible to simplify knowledge updating, localize the analysis logic for individual levels of the information structure, and maintain flexibility when operating conditions change. However, these approaches are mainly focused on single-level environments or do not take into account the context of multi-level interaction between modules, which limits the possibilities of their practical application in complex systems.

Thus, despite a significant number of publications, there are no holistic architectural solutions for building a modular expert system capable of performing security policy verification in a multi-level information environment, taking into account the specifics of its dynamics, hierarchy, and contextual interaction between components. It is this scientific gap that determines the need for further research in this direction.

Formulation of the purpose of the research

The purpose of the study is to develop an architecture of a modular expert system for verifying security policies in multi-level information environments, which provides flexibility, scalability, and adaptability to changing operating conditions.

Materials and methods

Modular expert system architecture. The proposed architecture of a modular expert system for security policy verification is based on the principles of modularity, hierarchy, extensibility, and integrativity. The system consists of independent functional blocks that interact through a common interface for knowledge management and exchange of verification results. Key components include expertise modules, each of which is responsible for a specific subject area or level of the system; a central knowledge base where formalized information about security policies is accumulated; an integration interface that provides data exchange with external sources (information systems, organizational policies, event logs); and a verification subsystem that initiates logical verification of policies according to established criteria.

The architecture provides a centralized controller that coordinates the exchange of information between modules, aggregates results, and is responsible for making agreed decisions in cases of conflicts. This approach provides flexible scaling of the system, localization of changes, independent updating of individual modules, and adaptation to new policy formats without a significant revision of the entire system.

Figure 1 shows a general architecture diagram: the system core, to which the examination modules, knowledge base, verification module and interface for interaction with the information environment are connected. The modules can be activated independently or by event trigger. The system can be expanded by connecting new modules without affecting other components.

The model of a multi-level information environment formalizes it as a structure consisting of logically separated levels: application, system and network. Each of the levels implements its own security policies, has separate access rules, authentication protocols, log storage formats, as well as specific restrictions on the execution of operations. The application level is responsible for user actions in the application software, role management, and permission verification based on business logic. The system level covers operating system policies, process protection, and control over access rights to files and resources. The network level includes mechanisms for firewalling, network segmentation, VPN policies, and inter-segment routing control.

The hierarchical model allows you to clearly delimit the scope of responsibility of each module of the expert system. This makes it possible to avoid duplication of checks, ensure consistency of analysis, and consistency in the application of policies, taking into account the inheritance of restrictions and permissions between levels. Typical scenarios are identified where lower-level rules may conflict with more general higher-level policies. In such cases, modules should use a reverse delegation mechanism to refine decisions.

Figure 2 shows a three-tier environment model with corresponding policy examples and security checkpoints. The hierarchy allows the expert system to implement vertical verification logic: from general organizational policies to specific technical constraints at the device and network levels.

Formalization of policies and logic for their processing. The model of security policy representation and processing within the framework of the proposed expert system is based on a unified representation of policies in the form of logical rules or decision trees, which provides formal processing, comparison and verification. Each rule is described by access

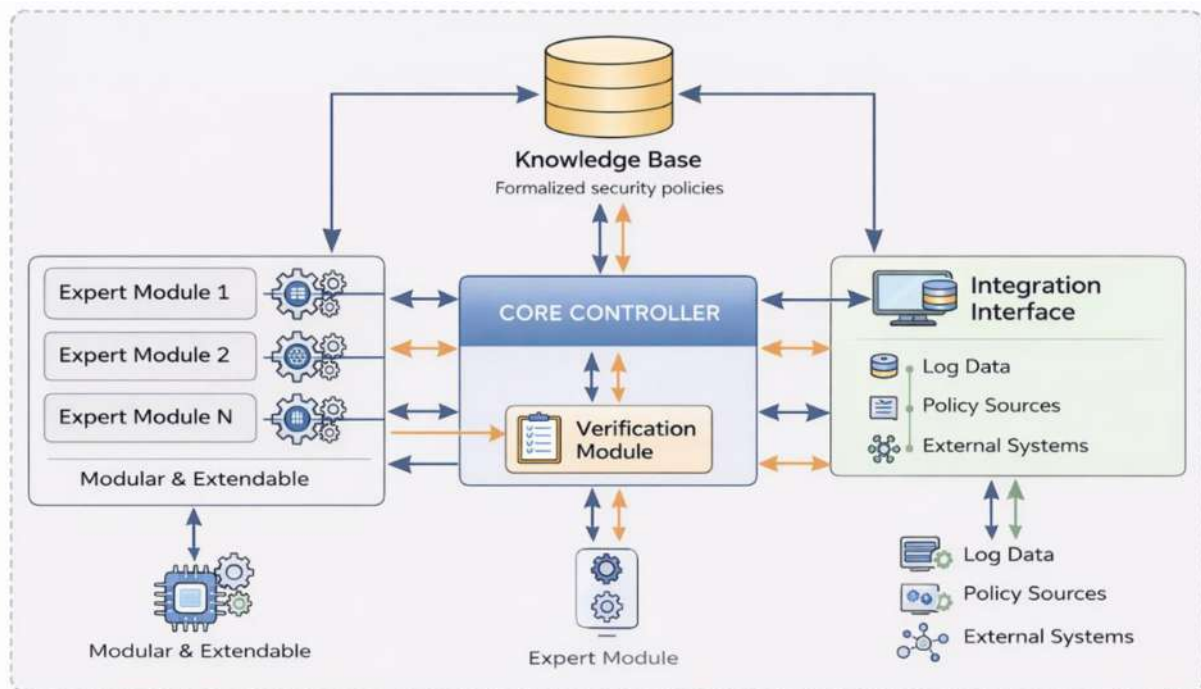


Fig. 1. General architecture of the expert system

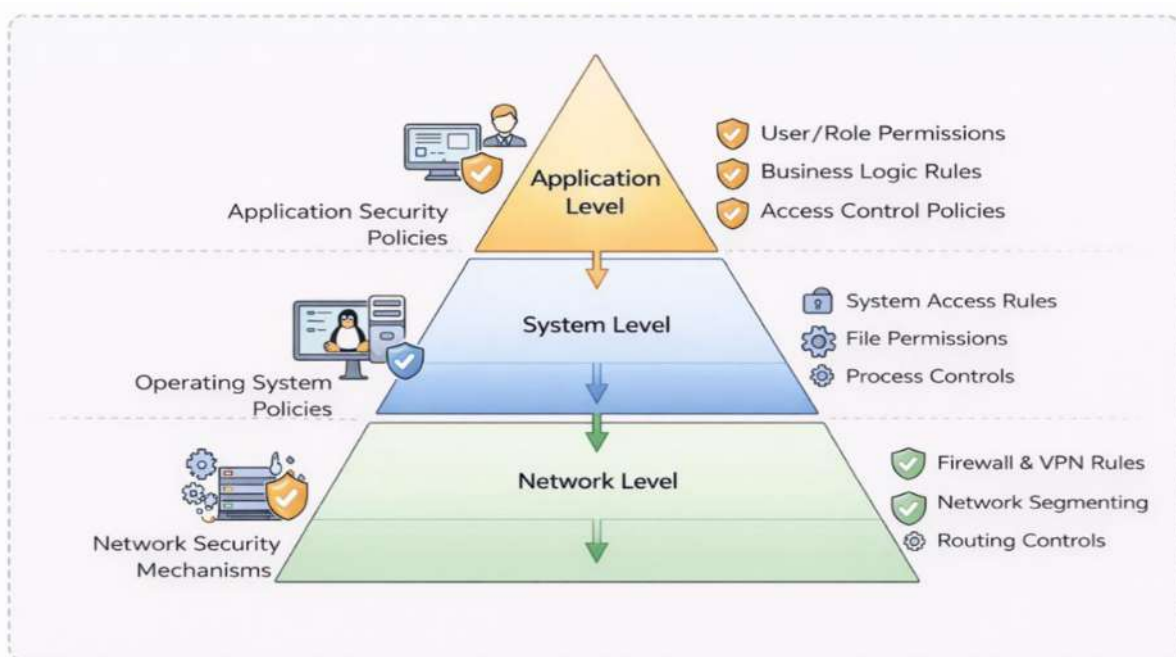


Fig. 2. Hierarchy of levels of the information environment

conditions and corresponding actions, which allows you to automate the verification of the legality of operations in the system. Formalization is carried out in the form of logical expressions, where each atomic element describes an attribute of the subject, object or access context.

For the formal representation of access policies in the form of logical constructs, the following generalized representation is used – IF (Subject.Role = 'Admin') $\wedge$ (Object.Type = 'Confidential') $\wedge$ (Time $\in$ WorkingHours) THEN Access = ALLOW.

This expression reflects a typical policy that allows only administrators to access sensitive objects during specified time intervals. This approach allows for a clear formalization of decision-making conditions and the application of logical methods for subsequent verification.

Table 1

Example of formalized policies

Policy ID	Subject.Role	Object.Type	Context (Time)	Access
P1	Admin	Confidential	WorkingHours	ALLOW
P2	User	Public	Any	ALLOW
P3	Guest	Confidential	Any	DENY
P4	Admin	SystemConfig	OffHours	DENY

This structure provides machine readability, facilitates the search for conflicts (for example, between policies P1 and P4) and supports automated processing by the verification module.

The policy verification mechanism in a modular environment is implemented as a set of independent modules, each of which is responsible for checking policies of its own level (network, system, application) or a specific category (access, authentication, confidentiality). These modules operate autonomously, but are synchronized via a central controller or data exchange bus. The modules receive policy fragments from the knowledge base, check their compliance with consistency rules and return the results in the form of a status: valid, conflict, lack of coverage.

In the event of conflicts between modules, a weighted consensus or priority mechanism is used, which determines which module is given priority. For example, network-level rules may have priority over application-level rules in the event of conflicts regarding access routing.

The diagram (Fig. 3) shows the logic of interaction between modules: each module receives a verification request from the controller, performs analysis, returns a result, which is aggregated and used to form a conclusion about the policy as a whole. Communication between modules is provided via an event-driven bus or API.

Prototyping of the basic configuration of the expert system was implemented using the Drools rule engine, which allows processing logic in the form of declarative rules. Knowledge is stored in the format of DRL files that support consistency checking and launching simulation scenarios. Each module is implemented as a separate service that interacts with the controller via REST API.

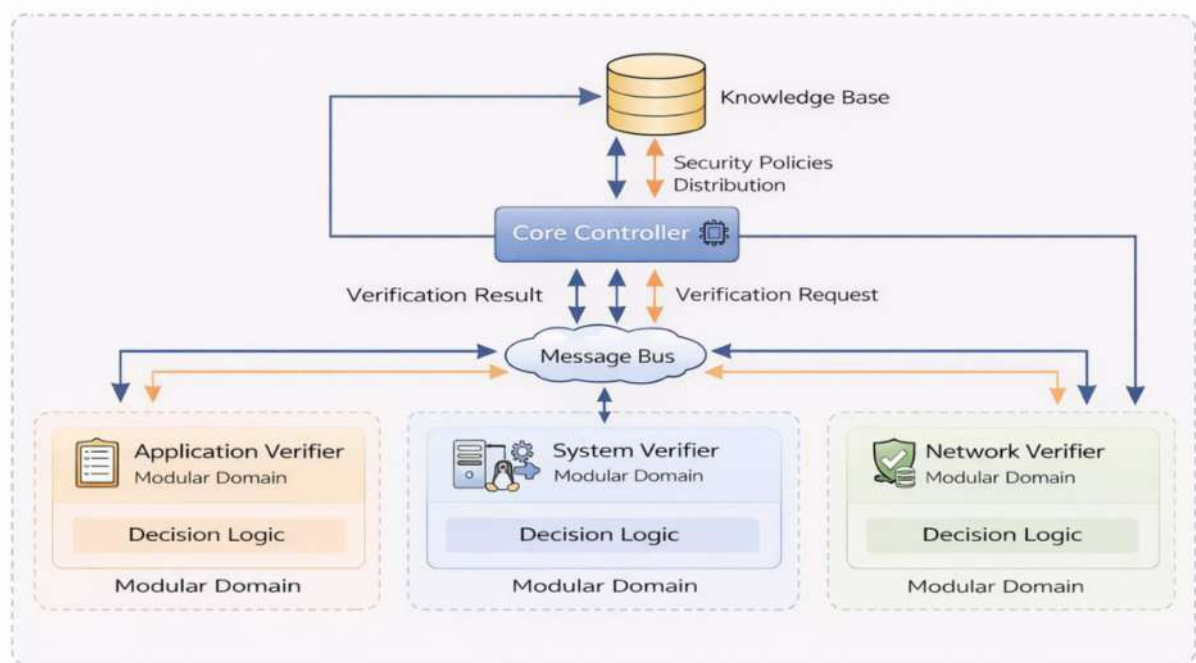


Fig. 3. Verification module interaction model

Within the framework of the application scenario, an information system with three access levels was considered: administrator, employee, and guest. For each of the levels, access policies to certain system objects were formed. A test simulation of requests to objects in different time and role contexts was conducted. The system successfully detected conflicting policies, as well as cases when some objects were not covered by any policy, which demonstrated the effectiveness of the verification mechanism and confirmed the operability of the proposed model.

The results of the experimental study confirmed the effectiveness of the proposed modular expert system for verifying security policies in a multi-level information environment. During the testing process, the system verified a set of policies

of varying complexity (from simple attribute-based to context-dependent), simulating work in a distributed environment with a large number of requests and conflicts. The analysis was carried out in comparison with two existing approaches: a centralized monolithic verification system and a hybrid system with partial modularity.

The evaluation was carried out according to the following key metrics:

- average verification time of one policy (ms);
- maximum number of simultaneously processed policies;
- knowledge update time after adding a new policy;
- flexibility of configuring modules for the domain (adaptability index);
- scalability during expansion (number of added modules without performance degradation).

Table 2

Comparative evaluation of systems

System	Verification time (ms)	Max politician	Update time (ms)	Adaptability	Scalability
Monolithic centralized	95	1 000	500	Low	Limited
Partially modular	60	2 500	240	Medium	Moderate
Proposed modular system	28	5 000	85	High	High

The proposed system showed the best results by all criteria. Its ability to adapt is especially noticeable: connecting a new module did not affect other parts of the system, and knowledge updating occurred with minimal delay. All components functioned independently, which allowed parallelizing the processes of policy analysis and increasing the overall speed.

The generalization of the results provides grounds for substantiating the scientific novelty and practical value of the study. The innovativeness of the architecture lies in the combination of full modularity with a centralized coordination core that does not interfere with the internal logic of the modules, but only synchronizes the results and conflicts. This approach allows you to scale the system while maintaining the integrity of the logic, and effectively adapt it to new policies and domains without violating the already implemented functions.

The advantages of the model are manifested in high flexibility, speed of adaptation to security changes, the ability to localize errors within a separate module, as well as the convenience of expanding knowledge without reviewing the entire database. Thanks to this approach, the tasks related to:

- policy verification in dynamic, heterogeneous environments;
- updating and merging policies from different sources;
- consistency control when changing the environment structure are more effectively solved.

The proposed architecture is suitable for implementation in complex information security systems operating at the organizational, state or critical level. It is especially appropriate in cases where high speed, reliability and scalability of security policy verification are priorities.

Conclusions

The study proposed an architectural approach to building a modular expert system focused on verifying security policies in multi-level information environments. Unlike traditional centralized or partially modular solutions, the developed system combines the independence of policy processing at each level with centralized coordination of results, which provides high flexibility, scalability and adaptability to changes.

The built model allows to distinguish policies by levels and domains, to detect conflicts and gaps in coverage, and to automatically reconcile verification results. Experimental testing has shown that the proposed system outperforms existing analogues in key performance metrics, including verification speed, adaptability to policy changes, and support for a large number of simultaneous checks. The results confirm the practical suitability of the system for use in heterogeneous distributed environments, where timely and reliable verification of security policy compliance is critical. The developed architecture can be the basis of a new generation of tools for automated analysis and management of security policies in complex IT infrastructures.

Bibliography

1. Burke, Q., Mehmeti, F., George, R. at al. Enforcing multilevel security policies in unstable networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2022. Vol. 19. No. 3. P. 2349–2365. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNSM.2022.3176820>
2. Rozlomii, I. O., Naumenko, S. V. Architecture and functional features of secured next-generation database management systems with serverless and edge computing support. *Systems and Technologies*. 2025. Vol. 69. No. 1. P. 130–137. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.16>
3. Akello, B. O. Organizational information security threats: Status and challenges. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*. 2024. Vol. 11. No. 1. P. 148-162. DOI: <https://doi.org/10.30574/wjaets.2024.11.1.0152>

4. Sikman, L., Sarajlic, N. Modelling of fuzzy expert system for an assessment of security information management system uis (university information system). *Tehnički vjesnik*. 2022. Vol. 29. No. 1. P. 60–65. DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20200721154801>
5. Panzer, M., Gronau, N. Designing an adaptive and deep learning based control framework for modular production systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2024. Vol. 35. No. 8. P. 4113–4136. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02249-3>
6. Розломий, І., Фауре, Е., Науменко, С. Методи аутентифікації у вбудованих системах з обмеженими обчислювальними ресурсами. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2025. Vol. 1. P. 29–35. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-4>
7. Babak, V., Babak, S., Eremenko, V., Kuts, Y., & Zaporozhets, A. Protection of Measurement Information from Unauthorized Access. In *Information-Measuring Systems: Theory and Application*, 2025, Cham: Springer Nature Switzerland, pp. 409–458. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-89406-0>
8. Forsyth, E., Horne, R. Clark-Wilson policies in ACP: controlling information flow between solid apps. In *CEUR Workshop Proceedings*, Leuven, Belgium, May 2–3, 2024. Vol. 3947, pp. 100–108. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3947/short14.pdf>
9. Singh, M. P., Sural, S., Vaidya, J., Atluri, V. A role-based administrative model for administration of heterogeneous access control policies and its security analysis. *Information Systems Frontiers*. 2024. Vol. 26. No. 6. P. 2255–2272. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10796-021-10167-z>
10. Ferreira, L., Silva, D. C., Itzazelaia, M. U. Recommender systems in cybersecurity. *Knowledge and Information Systems*. 2023. Vol. 65. No. 12. P. 5523–5559. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10115-023-01906-6>
11. Iatrellis, O., Stamatiadis, E., Samaras, N., et al. An intelligent expert system for academic advising utilizing fuzzy logic and semantic web technologies for smart cities education. *Journal of Computers in Education*. 2023. Vol. 10. No. 2. P. 293–323. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40692-022-00232-0>

References

1. Burke, Q., Mehmeti, F., George, R., Ostrowski, K., Jaeger, T., La Porta, T. F., & McDaniel, P. (2022). Enforcing multilevel security policies in unstable networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 19(3), pp. 2349–2365. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNSM.2022.3176820>
2. Rozlomii, I. O., & Naumenko, S. V. (2025). Architecture and functional features of secured next-generation database management systems with serverless and edge computing support. *Systems and Technologies*, 69(1), pp. 130–137. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.16>
3. Akello, B. O. (2024). Organizational information security threats: Status and challenges. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 11(1), pp. 148–162. DOI: <https://doi.org/10.30574/wjaets.2024.11.1.0152>
4. Sikman, L., & Sarajlic, N. (2022). Modelling of fuzzy expert system for an assessment of security information management system uis (university information system). *Tehnički Vjesnik*, 29(1), pp. 60–65. DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20200721154801>
5. Panzer, M., & Gronau, N. (2024). Designing an adaptive and deep learning based control framework for modular production systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35(8), pp. 4113–4136. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02249-3>
6. Rozlomii, I. O., Faure, E. V., & Naumenko, S. V. (2025). Authentication methods in embedded systems with limited computing resources. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, no. 1, pp. 29–35. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-4>
7. Babak, V., Babak, S., Eremenko, V., Kuts, Y., & Zaporozhets, A. (2025). Protection of Measurement Information from Unauthorized Access. In *Information-Measuring Systems: Theory and Application*, pp. 409–458. Cham: Springer Nature Switzerland. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-89406-0>
8. Forsyth, E., & Horne, R. (2024, May). Clark-Wilson policies in ACP: controlling information flow between solid apps. In *CEUR Workshop Proceedings*, Vol. 3947, pp. 100–108. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3947/short14.pdf>
9. Singh, M. P., Sural, S., Vaidya, J., & Atluri, V. (2024). A role-based administrative model for administration of heterogeneous access control policies and its security analysis. *Information Systems Frontiers*, 26(6), pp. 2255–2272. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10796-021-10167-z>
10. Ferreira, L., Silva, D. C., & Itzazelaia, M. U. (2023). Recommender systems in cybersecurity. *Knowledge and Information Systems*, 65(12), pp. 5523–5559. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10115-023-01906-6>
11. Iatrellis, O., Stamatiadis, E., Samaras, N., Panagiotakopoulos, T., & Fitsilis, P. (2023). An intelligent expert system for academic advising utilizing fuzzy logic and semantic web technologies for smart cities education. *Journal of Computers in Education*, 10(2), pp. 293–323. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40692-022-00232-0>

Дата першого надходження статті до видання: 11.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

В. П. РОМАНЕНКОкандидат технічних наук, доцент,
науково-педагогічний працівник

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID: 0000-0002-8668-177X

Н. О. ЧІКІНА

кандидат технічних наук, доцент,

професор кафедри вищої математики

Інститут механічної інженерії і транспорту

Національного технічного університету

«Харківський політехнічний інститут»

ORCID: 0000-0002-0643-1771

В. І. НЕКРУТЕНКО

доктор філософії, науково-педагогічний працівник

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID: 0009-0001-2843-7824

ПРОГНОЗУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ НА ОСНОВІ BIG DATA

Актуальність дослідження зумовлена стрімким зростанням обсягів трафіку, різноманітністю сервісів і підвищеними вимогами до затримки, надійності та якості обслуговування в телекомунікаційних мережах п'ятого покоління (далі – 5G). У таких умовах традиційні реактивні підходи до управління мережними ресурсами виявляються недостатньо ефективними, що актуалізує використання технологій великих даних (далі – Big Data) як інструменту проактивного прогнозування навантаження та підвищення стійкості функціонування мережної інфраструктури.

Мета статті полягає в науковому обґрунтуванні та розробленні підходів до прогнозування навантаження в телекомунікаційних мережах 5G із застосуванням технологій Big Data з метою підвищення ефективності управління мережними ресурсами й забезпечення стабільної якості обслуговування.

Методи дослідження базуються на системному аналізі сучасних підходів до прогнозування мережного навантаження, узагальненні методів обробки великих масивів гетерогенних мережних даних, а також на чисельному експерименті з використанням часових рядів навантаження осередків мережі. Застосовано порівняльний аналіз реактивного й прогнозно орієнтованого управління ресурсами на основі інтелектуальних моделей.

Результати дослідження свідчать, що навантаження в мережах 5G має нелінійний просторово-часовий характер, який доцільно враховувати шляхом використання підходів Big Data. Установлено, що інтеграція прогнозних моделей у контури управління ресурсами дозволяє зменшити частоту перевантажень, підвищити середній рівень використання ресурсів і скоротити кількість коригувальних управлінських дій. Доведено, що навіть відносно прості інтелектуальні моделі, навчені на історичних даних, забезпечують кількісно вимірюваний позитивний ефект у практичних сценаріях експлуатації мереж.

Висновки полягають у тому, що застосування технологій Big Data є доцільною й ефективною основою для прогнозування навантаження та проактивного управління ресурсами телекомунікаційних мереж 5G. Виявлено ключові проблеми прогнозування, пов'язані з якістю та гетерогенністю даних, масштабованістю моделей, затримками обробки й обмеженою інтерпретованістю результатів.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розвитком гібридних прогнозних моделей, удосконаленням просторово-часового аналізу навантаження, підвищенням інтерпретованості результатів прогнозування й інтеграцією таких підходів із концепцією цифрових двійників телекомунікаційних мереж.

Ключові слова: просторово-часова динаміка трафіку, управління мережними ресурсами, інтелектуальні прогнозні моделі, аналіз Big Data, проактивне управління мережею, якість обслуговування, адаптивні телекомунікаційні системи.



V. P. ROMANENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Scientific and Pedagogical Worker
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-8668-177X

N. O. CHIKINA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Higher Mathematics
Institute of Education and Science in Mechanical Engineering and Transport
of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-0643-1771

V. I. NEKRUTENKO

Doctor of Philosophy (PhD),
Scientific and Pedagogical Staff
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0009-0001-2843-7824

FORECASTING LOAD IN FIFTH GENERATION TELECOMMUNICATION NETWORKS BASED ON BIG DATA

The relevance of this study is driven by the rapid growth of traffic volumes, service heterogeneity, and increased requirements for latency, reliability, and quality of service in fifth generation telecommunication networks (hereinafter referred to as 5G). Under such conditions, traditional reactive approaches to network resource management prove to be insufficiently effective, which makes the use of Big Data technologies relevant as a tool for proactive load forecasting and for enhancing the resilience of network infrastructure operation.

The purpose of the article is the scientific substantiation and development of approaches to load forecasting in 5G telecommunication networks using Big Data technologies in order to improve the efficiency of network resource management and to ensure stable quality of service.

The research methods are based on a system analysis of contemporary approaches to network load forecasting, the generalization of methods for processing large volumes of heterogeneous network data, as well as numerical experiments using time series of network cell load. A comparative analysis of reactive and forecast oriented resource management based on intelligent models is applied.

The research results indicate that load in 5G networks exhibits a nonlinear spatiotemporal nature, which should be taken into account through the use of Big Data approaches. It is established that the integration of forecasting models into resource management loops makes it possible to reduce the frequency of overloads, increase the average level of resource utilization, and decrease the number of corrective management actions. It is demonstrated that even relatively simple intelligent models trained on historical data provide a quantitatively measurable positive effect in practical network operation scenarios.

The conclusions indicate that the application of Big Data technologies represents an appropriate and effective basis for load forecasting and proactive resource management in 5G telecommunication networks. Key forecasting challenges related to data quality and heterogeneity, model scalability, processing delays, and limited interpretability of results are identified.

Prospects for further research are associated with the development of hybrid forecasting models, the improvement of spatiotemporal load analysis, the enhancement of result interpretability, and the integration of such approaches with the concept of digital twins of telecommunication networks.

Key words: spatiotemporal traffic dynamics, network resource management, intelligent forecasting models, Big Data analytics, proactive network management, quality of service, adaptive telecommunication systems.

Постановка проблеми

Стрімкий розвиток телекомунікаційних мереж 5G характеризується істотним зростанням обсягів переданих даних, різноманітням типів трафіку й високими вимогами до затримки, надійності і якості обслуговування, що істотно ускладнює процеси управління мережними ресурсами. У цих умовах традиційні підходи до планування й моніторингу навантаження втрачають ефективність через обмежену здатність урахувувати нелінійний характер трафіку, динамічну змінність поведінки користувачів і вплив зовнішніх чинників. Актуальність проблеми прогнозування навантаження в мережах 5G зумовлена необхідністю забезпечення стабільної роботи мережної інфраструктури, оптимального розподілу радіочастотних та обчислювальних ресурсів, а також мінімізації перевантажень і втрат якості сервісів.

Використання підходів Big Data відкриває нові можливості для глибокого аналізу великих масивів гетерогенних мережних даних, що формуються в реальному часі та відображають просторово-часову структуру трафіку, характеристики користувацької активності й стан елементів мережі. Водночас науковою проблемою залишається обґрунтування методологічних засад інтеграції технологій аналізу Big Data в завдання прогнозування навантаження з урахуванням масштабованості, адаптивності й інтерпретованості моделей. Розв'язання цієї проблеми має безпосередній зв'язок із важливими науковими й практичними завданнями підвищення ефективності функціонування мереж 5G, розвитку інтелектуальних систем управління телекомунікаційною інфраструктурою, зниження операційних витрат операторів зв'язку та забезпечення якості цифрових сервісів у критично важливих сферах економіки й суспільства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд наукових публікацій засвідчує комплексний характер досліджуваної проблематики та її тісний зв'язок із розвитком архітектури мереж, інтелектуальних методів аналізу даних і практик управління мережею. У роботі М. Дж. Ал-Дуджайлі (М. J. Al-Dujaili) та М. А. Ал-Дулаймі (М. A. Al-dulaimi) систематизовано ключові характеристики, архітектурні рівні й виклики технологій 5G, що зумовлюють різке зростання обсягів і складності мережевого трафіку та потребу у використанні Big Data для його прогнозування [1]. Автори В. Цзян (W. Jiang) та Б. Хань (B. Han) простежують еволюцію мобільних мереж до стандартів 5G, наголошуючи на ролі віртуалізації мережевих функцій і сервісно орієнтованих архітектур як джерел гетерогенних даних, придатних для побудови прогнозних моделей навантаження [2]. Очікування ж від мереж beyond 5G аналізують М. М. Абд Ел-Хамід та співавтори (М. М. Abd El-Hamid et al.), підкреслюючи, що досягнення підвищених показників пропускної здатності й затримок неможливе без проактивного прогнозування трафіку [3]. Тоді як Д. Узунідіс та співавтори (D. Uzunidis et al.) формують бачення розвитку фіксованих мереж шостого покоління, що додатково актуалізує необхідність масштабованих моделей прогнозування навантаження в умовах надвисокої щільності з'єднань [4].

Важливу групу досліджень становлять роботи, у яких увага зосереджена на технологічних та інженерних чинниках, що визначають якість і безперервність даних для прогнозування. Так, Е. М. Мігабо (E. M. Migabo) аналізує перспективи проектування систем електроживлення базових станцій 5G і beyond, демонструючи, що стабільність енергозабезпечення є критичною умовою безперервного збору телеметричних даних для аналізу навантаження [5]. Застосування методів штучного інтелекту в мережах 5G для аналізу трафіку й підтримки управлінських рішень аналізують А. Н. Хассан та співавтори (A. N. Hassan et al.), формуючи концептуальну основу використання Big Data в прогнозуванні навантаження [6]. Тоді як М. А. Н. Харір та співавтори (M. A. N. Harir et al.) пропонують підхід до прогнозування мережевого трафіку 5G із використанням federated learning, що дозволяє працювати з розподіленими Big Data без їх централізації й з урахуванням вимог конфіденційності [7]. Автор В. Жебка доводить ефективність нейронної моделі прогнозування навантаження в гетерогенних телекомунікаційних мережах, демонструючи здатність глибокого навчання виявляти складні нелінійні закономірності у великих масивах трафікових даних [8].

Значний масив робіт присвячено використанню результатів прогнозування навантаження для управління функціонуванням гетерогенних мереж 5G. Зокрема, В. І. Кравченко обґрунтовує доцільність застосування прогнозів навантаження для оптимізації розподілу мережевих ресурсів, що безпосередньо впливає на якість обслуговування й ефективність використання інфраструктури [9]. Методи управління стійкою гетерогенною телекомунікаційною мережею в умовах дії дестабілізуювальних чинників аналізують В. В. Жебка та співавтори, підкреслюючи роль прогнозування трафіку в запобіганні перевантаженням і деградації сервісів [10]. А методику прогнозування мобільності користувачів у мережах 5G, що є ключовим складником просторово-часового прогнозу навантаження та планування ресурсів, розглядають В. О. Власенко та співавтори [11]. Тоді як Ю. Бершчанський та співавтори (Y. Bershchanskyi et al.) демонструють можливості контейнеризованих AI-систем у хмарних і кіберфізичних середовищах для масштабованого впровадження сервісів прогнозування трафіку [12].

Окрему увагу в сучасних дослідженнях приділено питанням безпеки, архітектури й валідації систем прогнозування навантаження. Так, І. Р. Опірський та співавтори аналізують технічні особливості реалізації шифрування даних на SD-картах в Android, наголошуючи на важливості захисту джерел даних, що використовуються в аналітичних і прогнозних системах телекомунікаційних мереж [13]. У роботі М. Дорошенко (M. Doroshenko) висвітлено архітектурні, правові й безпекові аспекти інтелектуальних інформаційно-управлінських систем у цифрових інфраструктурах, формуючи нормативне підґрунтя застосування Big Data для прогнозування навантаження [14]. А Д. Кияшко (D. Kyiashko) пропонує гібридний фреймворк тестування мультимодальних систем на основі AI-агентів, що створює методичну основу для валідації складних Big Data-орієнтованих прогнозних вирішень у телекомунікаційних мережах [15].

Попри наявні дослідження у сфері прогнозування навантаження в телекомунікаційних мережах 5G, залишаються невирішеними питання комплексного урахування різномірності трафіку й просторово-часової динаміки мережної активності, масштабованості моделей за зростання обсягів даних, а також практичної інтерпретованості прогнозних результатів у процесах управління ресурсами. Обмеженість узагальнених емпіричних оцінок ефективності прогнозування стримує широке впровадження підходів Big Data в реальні мережі 5G. Запропоноване дослідження спрямоване на заповнення цих прогалин шляхом системного поєднання аналізу динаміки навантаження, підходів Big Data та інтелектуальних прогнозних моделей з орієнтацією на практичні завдання управління

ресурсами мереж 5G. Отримані результати й рекомендації сприяють підвищенню надійності, ефективності та прикладної придатності прогнозування навантаження в сучасних телекомунікаційних мережах.

Формулювання мети дослідження

Мета статті полягає в розробленні та науковому обґрунтуванні підходів до прогнозування навантаження в телекомунікаційних мережах 5G на основі використання технологій Big Data для підвищення ефективності управління мережними ресурсами й забезпечення стабільної якості обслуговування.

Для досягнення мети в статті поставлено такі завдання:

1. Дослідити особливості формування та просторово-часової динаміки навантаження в телекомунікаційних мережах 5G з урахуванням різномірності трафіку.
2. Обґрунтувати можливості застосування технологій Big Data й інтелектуальних моделей для прогнозування навантаження і підтримки управління ресурсами мереж 5G.
3. Виявити ключові науково-практичні проблеми прогнозування навантаження та розробити рекомендації щодо підвищення надійності й ефективності систем управління телекомунікаційними мережами.

Викладення основного матеріалу дослідження

У телекомунікаційних мережах 5G формування й динаміка навантаження визначаються поєднанням високої щільності підключень, гетерогенності сервісів і вираженої просторово-часової мінливості мережної активності. На відміну від попередніх поколінь, навантаження в мережах 5G формується одночасною підтримкою сервісів із принципово різними вимогами до пропускної здатності, затримки та надійності, що зумовлює складну, нелінійну структуру трафіку. Поведінка користувачів і пристроїв у просторі й часі призводить до концентрації навантаження в окремих сегментах мережі, формування регулярних добових патернів і виникнення короточасних, але інтенсивних пікових навантажень, які мають істотний вплив на якість обслуговування (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристики формування навантаження в телекомунікаційних мережах 5G

Тип трафіку	Основні джерела формування	Просторово-часові особливості	Вплив на навантаження
eMBB	Відеостримінг, хмарні сервіси, мобільний інтернет	Висока концентрація в міських зонах, пікові значення у вечірній час	Формування тривалих піків із високими вимогами до пропускної здатності
mMTC	Інтернет речей, сенсорні мережі, промислові датчики	Рівномірний просторовий розподіл, періодичні передачі даних	Значне зростання кількості з'єднань за відносно низького трафіку на пристрій
URLLC	Критичні промислові системи, автономний транспорт	Локалізована активність, жорсткі часові обмеження	Локальні пікові навантаження з високими вимогами до затримки
Подієвий трафік	Масові заходи, транспортні вузли, надзвичайні ситуації	Різкі сплески в обмежених зонах і коротких часових інтервалах	Короточасні перевантаження з високим ризиком деградації сервісів

Джерело: сформовано на основі [1, р. 454; 2, р. 153; 3, р. 156; 8, с. 506; 11, с. 138].

Наведені характеристики мають безпосереднє практичне значення для експлуатації мереж 5G, оскільки кожен тип трафіку формує специфічні сценарії навантаження, що потребують різних підходів до управління ресурсами. Так, у випадку розширеного мобільного широкосмугового доступу (enhanced Mobile Broadband (eMBB)) у великих містах оператори стикаються з регулярними вечірніми піками, спричиненими масовим споживанням відеоконтенту, що вимагає динамічного перерозподілу радіочастотного спектра між базовими станціями. Масові машинні комунікації (massive Machine Type Communications (mMTC)), характерні для «розумних» міст і промислових об'єктів, створюють стабільне фонове навантаження з великою кількістю одночасних підключень, що на практиці змушує оптимізувати сигнальні процедури й механізми доступу до мережі [11, с. 138]. Наднадійні низькозатримкові комунікації (Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC)), які використовуються, зокрема, в автоматизованих виробничих лініях або транспортних системах, формують локальні, але критично важливі піки навантаження, де навіть незначні затримки можуть призвести до збоїв у роботі сервісів [2, р. 153]. Подієвий трафік, характерний для стадіонів, концертних майданчиків або транспортних хабів, у практичних умовах потребує попереднього прогнозування та тимчасового посилення мережної інфраструктури для запобігання перевантаженням. У сукупності це зумовлює необхідність комплексного аналізу просторово-часових характеристик навантаження й використання прогнозних моделей, здатних урахувати реальні сценарії функціонування мереж 5G в сучасних умовах.

Сучасні підходи до використання технологій Big Data в завданнях аналізу й прогнозування мережного навантаження в телекомунікаційних системах ґрунтуються на обробці великих, швидкозмінних і різномірних масивів мережної інформації, що формується в процесі функціонування інфраструктури зв'язку. Застосування Big Data дає змогу перейти від реактивного аналізу стану мережі до проактивного прогнозування навантаження на основі виявлення прихованих закономірностей у просторово-часових даних, агрегації історичних вимірювань і використання контекстної інформації. Аналітичний потенціал таких підходів полягає в здатності масштабовано обробляти телеметрію мережних елементів, журнали сигналізації, дані користувацької активності й сервісних платформ, формуючи основу для побудови точних та адаптивних прогнозних моделей (табл. 2).

Таблиця 2

Підходи Big Data до аналізу й прогнозування мережного навантаження в телекомунікаційних мережах

Підхід	Аналітична основа	Функційні можливості прогнозування
Потокова аналітика	Потоки телеметрії мережних елементів у режимі реального часу	Оперативне виявлення трендів навантаження й короткострокове прогнозування пікових станів
Пакетна аналітика великих масивів	Історичні дані навантаження та статистика мережної роботи	Виявлення довгострокових закономірностей, сезонності й повторюваних режимів
Ознакове моделювання з контекстними даними	Мережні метрики, доповнені часовими, географічними й подієвими ознаками	Підвищення точності прогнозів з урахуванням зовнішніх чинників
Глибоке навчання часових рядів	Багатовимірні часові ряди навантаження	Моделювання нелінійної динаміки й багатокрокове прогнозування
Просторово-часове моделювання	Дані суміжних осередків мережі й топологічні зв'язки	Урахування просторової кореляції й міграції навантаження
Адаптивне самонавчання	Безперервне оновлення моделей на основі нових даних	Підтримка актуальності прогнозів у динамічних умовах

Джерело: сформовано на основі [6, р. 322; 7; 8, с. 509; 9, с. 91; 12, р. 154].

Використання підходів Big Data в прогнозуванні мережного навантаження забезпечує практичну інтеграцію аналітики даних у контури управління телекомунікаційними мережами, орієнтовану на підтримку оперативних і стратегічних вирішень. Потокова аналітика в реальному часі застосовується для формування короткострокових прогнозів навантаження на рівні осередків мережі, що дозволяє заздалегідь ініціювати керівні дії, зокрема динамічний перерозподіл пропускної здатності й корекцію параметрів радіодоступу в зонах очікуваного зростання трафіку. У практиці експлуатації це має вирішальне значення для забезпечення стабільності сервісів у пікові часові інтервали [6, р. 322]. Пакетна аналітика історичних масивів мережних даних використовується для середньо- й довгострокового прогнозування навантаження з метою планування розвитку інфраструктури. Аналіз накопичених часових рядів дає змогу виявляти повторювані просторово-часові режими й прогнозувати майбутні тенденції зростання трафіку, що безпосередньо використовується під час ухвалення рішень щодо модернізації мережі, розміщення додаткових вузлів та оптимізації топології. Залучення контекстних ознак у межах ознакового моделювання дозволяє пов'язувати прогнозні оцінки з конкретними умовами функціонування мережі, як-от календарні цикли, мобільність населення або події навантаження, підвищуючи прикладну інтерпретованість результатів [12, р. 154]. Глибоке моделювання часових рядів і просторово-часові підходи використовуються для прогнозування складної нелінійної динаміки навантаження та взаємовпливу між суміжними сегментами мережі. У практичних сценаріях це забезпечує можливість локалізації майбутніх зон перевантаження й оцінювання ефектів перетікання трафіку між осередками мережі, що критично важливо для управління ресурсами в умовах високої щільності користувачів [7]. Адаптивні самонавчальні механізми підтримують актуальність прогнозів за умов швидкої зміни мережних конфігурацій і поведінкових патернів користувачів, забезпечуючи безперервне коригування прогнозних моделей. У результаті застосування технологій Big Data формує практичну основу для переходу до проактивного управління навантаженням у телекомунікаційних мережах 5G, орієнтованого на підвищення ефективності використання ресурсів і якості обслуговування.

Доцільність застосування інтелектуальних моделей прогнозування навантаження на основі Big Data для підтримки управління ресурсами мереж 5G було обґрунтовано на основі чисельного експерименту з використанням агрегованих мережних даних. Експеримент проводився на часових рядах навантаження осередків мережі, сформованих за показниками обсягу переданих даних і кількості активних з'єднань із дискретністю 15 хвилин. Для навчання й валідації моделей використовувався масив історичних даних тривалістю 60 діб, який поділявся на навчальну та тестову вибірки в співвідношенні 70:30. Як базовий сценарій розглядався варіант управління ресурсами без використання прогнозування, у якому коригування розподілу ресурсів здійснювалося реактивно, після фіксації перевантаження.

У прогнозованому сценарії застосовувалася інтелектуальна модель часових рядів на основі машинного навчання, навчена на багатовимірних ознаках, що охоплювали історичні значення навантаження, часові індикатори й агреговані просторові характеристики осередків мережі. Прогноз формувався з горизонтом 1 годину й використовувався як вхідний параметр для ухвалення рішень щодо попереднього перерозподілу ресурсів між суміжними осередками мережі (табл. 3).

Отримані результати підтверджують, що використання інтелектуальної прогнозової моделі забезпечує істотне підвищення ефективності управління ресурсами мережі 5G, як порівняти з реактивним підходом. Зменшення середньої абсолютної похибки прогнозу більш ніж у 2,5 раза свідчить про здатність моделі адекватно відтворювати короткострокову динаміку навантаження. Це безпосередньо відображається на практичних показниках експлуатації мережі, зокрема в скороченні частоти перевантажених часових інтервалів і зменшенні кількості коригувальних дій, необхідних для стабілізації роботи осередків мережі [9, с. 93]. Практична інтерпретація експерименту полягає в тому, що перехід від реактивного до прогнозно орієнтованого управління ресурсами дозволяє ухвалювати рішення на основі очікуваного, а не фактичного стану мережі. Навіть за використання відносно простих

Таблиця 3

Порівняльні результати експериментального оцінювання ефективності управління ресурсами мережі 5G

Показник	Реактивне управління (найвний прогноз)	Управління з використанням інтелектуальної моделі
Середня абсолютна похибка прогнозу навантаження, %	18,6	7,4
Частка часових інтервалів із перевантаженням осередків, %	15,2	8,1
Середній рівень використання ресурсів, %	64,7	76,3
Кількість коригувальних дій за добу	11–13	5–7
Частота деградації якості сервісів	Висока	Помірна

Джерело: сформовано автором на основі [8, с. 512; 9, с. 93; 10, с. 156; 11, с. 140; 15, с. 1781].

інтелектуальних моделей, навчання яких здійснюється на великих масивах історичних даних, досягається рівномірніше використання ресурсів і зниження ризику деградації якості сервісів. Таким чином, експериментально обґрунтовано доцільність застосування інтелектуальних моделей прогнозування навантаження на основі Big Data як ефективного інструменту підтримки процесів управління ресурсами телекомунікаційних мереж 5G.

Прогнозування навантаження в телекомунікаційних мережах 5G супроводжується низкою взаємопов'язаних науково-практичних проблем, що обмежують стабільність і відтворюваність результатів прогнозування в реальних умовах експлуатації. Одна з базових проблем – якість вхідних даних, зумовлена наявністю пропусків, шуму, асинхронності вимірювань і неоднорідності джерел телеметрії, що ускладнює формування репрезентативних навчальних вибірок та призводить до зміщення прогнозних оцінок. Гетерогенність даних, пов'язана з одночасним використанням мережних, користувацьких і контекстних показників, створює додаткові труднощі узгодження форматів, масштабів та часових інтервалів, що підвищує складність інженерії ознак і збільшує ризик помилкових кореляцій [15, с. 1781]. Істотною проблемою залишається масштабованість прогнозних моделей у середовищі розподілених мереж 5G, де зростання кількості осередків, користувачів і параметрів трафіку призводить до різкого збільшення обчислювального навантаження. Моделі, ефективні на обмежених ділянках мережі, не завжди зберігають точність і стабільність за розгортання на рівні всієї інфраструктури, що ускладнює їх інтеграцію в промислові системи управління [10, с. 156]. Додатковим обмеженням є затримки обробки даних і формування прогнозів, які в умовах високодинамічного трафіку можуть знижувати практичну цінність прогнозування, оскільки управлінські рішення ухвалюються із запізненням відносно фактичного стану мережі. Окрему науково-практичну проблему становить обмежена інтерпретованість результатів прогнозування, характерна для складних інтелектуальних моделей. Неможливість чітко пояснити причини сформованого прогнозу ускладнює використання результатів у контурах управління, знижує довіру до моделей з боку операторів мережі й обмежує можливість формалізації правил ухвалення рішень. Додатково варто відзначити проблему дрейфу даних і поведінкових патернів користувачів, унаслідок чого моделі, навчені на історичних даних, поступово втрачають актуальність, а також складність забезпечення узгодженості між точністю прогнозування та вимогами до надійності й стабільності управлінських рішень.

Упровадження підходів Big Data в системи прогнозування навантаження телекомунікаційних мереж 5G доцільно здійснювати на основі поетапної інтеграції аналітичних компонентів у наявні контури управління ресурсами з орієнтацією на практичну надійність і відтворюваність результатів. Насамперед рекомендовано забезпечити єдині вимоги до якості й синхронізації мережних даних, включно з регулярною валідацією, усуненням пропусків і нормалізацією часових інтервалів, що створює стабільну основу для навчання прогнозних моделей та знижує ризик накопичення систематичних похибок. З метою підвищення ефективності прогнозування доцільно поєднувати потокову й пакетну аналітику, використовуючи короткострокові прогнози для оперативного управління ресурсами, а результати довгострокового аналізу – для стратегічного планування розвитку мережної інфраструктури. Практично виправданим є впровадження прогнозних моделей за принципом поступового ускладнення, починаючи з базових та інтерпретованих вирішень і переходячи до складніших інтелектуальних моделей лише за умови підтвердженого кількісного ефекту. Це дозволяє зберігати керованість системи й забезпечувати прийнятність результатів для експлуатаційного персоналу. Для підвищення надійності управлінських рішень рекомендовано використовувати прогнозні оцінки не ізольовано, а в поєднанні з пороговими механізмами й сценаріями перевірки, що дає змогу уникати ризикованих дій у разі високої невизначеності прогнозу. Окрему увагу варто приділяти регулярному оновленню моделей і контролю дрейфу даних, забезпечуючи адаптацію прогнозування до змін конфігурації мережі й поведінки користувачів. З позицій практичної ефективності доцільно інтегрувати системи прогнозування навантаження з інструментами моніторингу й візуалізації, що забезпечує прозорість результатів і спрощує їх використання в процесах ухвалення рішень. Орієнтація на інтерпретовані показники, кількісні метрики ефективності й чітко визначені критерії успішності впровадження дозволяє підвищити довіру до прогнозних моделей та обґрунтовано оцінювати їхній внесок у стабільність функціонування мережі. У сукупності реалізація зазначених рекомендацій створює передумови для підвищення надійності, ефективності й практичної цінності систем прогнозування навантаження телекомунікаційних мереж 5G на основі підходів Big Data.

Висновки

У процесі дослідження встановлено, що навантаження в телекомунікаційних мережах 5G має складну нелінійну просторово-часову структуру, зумовлену різноманітністю трафіку, високою щільністю підключень і динамічною поведінкою користувачів, що обмежує ефективність реактивних підходів до управління ресурсами. Показано, що застосування підходів Big Data створює аналітичні передумови для переходу до проактивного прогнозування навантаження на основі масштабованої обробки гетерогенних мережних даних і виявлення стійких закономірностей їхньої динаміки. Експериментально підтверджено, що інтеграція інтелектуальних прогнозних моделей у контури управління ресурсами мереж 5G забезпечує кількісно вимірюване зменшення перевантажень, підвищення рівня використання ресурсів і зниження частоти коригувальних дій. Водночас виявлено ключові науково-практичні проблеми прогнозування, пов'язані з якістю й гетерогенністю даних, масштабованістю моделей, затримками обробки, обмеженою інтерпретованістю результатів і дрейфом поведінкових патернів. Обґрунтовано, що підвищення надійності й ефективності систем прогнозування потребує поетапного впровадження моделей, поєднання потокової й пакетної аналітики, контролю якості даних та орієнтації на інтерпретовані показники. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розвитком гібридних прогнозних моделей, удосконаленням просторово-часового моделювання й інтеграцією прогнозування навантаження з концепцією цифрових двійників телекомунікаційних мереж.

Список використаної літератури

1. Al-Dujaili M. J., Al-dulaimi M. A. Fifth-generation telecommunications technologies: Features, architecture, challenges and solutions. *Wireless Personal Communications*. 2023. Vol. 128, No. 1. P. 447–469. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-022-09962-x>
2. Jiang W., Han B. Evolution to Fifth-Generation (5G) Mobile Cellular Communications. In: *Cellular Communication Networks and Standards: The Evolution from 1G to 6G*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. P. 149–168. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-57820-5_9
3. Abd El-Hamid M. M., Zaghloul M. F., Kolkila A. A. E. A. Beyond fifth generation (5G) networks and better performance expectations for cellular wireless networks. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*. 2024. Vol. 19, No. 72. P. 150–166. DOI: <https://doi.org/10.21608/aej.2024.252471.1501>
4. Uzunidis D., Moschopoulos K., Papapavlou C., Paximadis K., Marom D. M., Nazarathy M., Tomkos I. A vision of 6th generation of fixed networks (F6G): challenges and proposed directions. *Telecom*. 2023. Vol. 4, No. 4. P. 758–815. DOI: <https://doi.org/10.3390/telecom4040035>
5. Migabo E. M. The future of power supply design for next generation networks (5G and beyond) base stations. In: *2024 4th International Multidisciplinary Information Technology and Engineering Conference (IMITEC)*. IEEE, 2024. P. 383–389. DOI: <https://doi.org/10.1109/IMITEC60221.2024.10850977>
6. Hassan A. N., Al-Chlaihawi S., Khekan A. R. Artificial intelligence techniques over the fifth generation (5G) mobile networks. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2021. Vol. 24, No. 1. P. 317–328. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v24.i1.pp317-328>
7. Harir M. A. N., Ataro E., Nyah C. T. Machine learning-based fifth-generation network traffic prediction using federated learning. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*. 2025. Vol. 16, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2025.0160130>
8. Жебка В. Прогнозування навантаження в гетерогенних телекомунікаційних мережах на основі розробленої нейронної моделі. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*. 2024. Вип. 2(26). С. 503–514. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.26.788>
9. Кравченко В. І. Підвищення якості гетерогенних телекомунікаційних мереж за допомогою розподілу ресурсів на основі прогнозів. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2024. № 1. С. 88–94. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.018894>
10. Жебка В. В., Нестеренко К. С., Жебка С. В. Методи управління стійкою гетерогенною телекомунікаційною мережею в умовах впливу дестабілізуючих чинників. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2025. № 1. С. 151–160. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.017512>
11. Власенко В. О., Скіяренко В. І., Зуб О. В. Методика прогнозування мобільності користувачів у 5G-мережах. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2024. № 4. С. 136–141. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.041861>
12. Bershchanskyi Y., Klym H., Shevchuk Y. Containerized artificial intelligent system design in cloud and cyber-physical systems. *Advances in Cyber-Physical Systems*. 2024. Vol. 9, No. 2. P. 151–157. DOI: <https://doi.org/10.23939/acps2024.02.151>
13. Опірський І. Р., Хохлачова Ю. Є., Стефанків А. В., Шевчук Ю. А. Аналіз технічних особливостей реалізації шифрування даних на SD-картах в Android. *Сучасний захист інформації*. 2025. Вип. 1, № 61. С. 219–228. DOI: <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2025.016526>
14. Doroshenko M. Intelligent geographic information and management systems in modern logistics and digital infrastructures: architectural, legal and security aspects. *Futurity Proceedings*. 2025. Vol. 5. P. 281–286. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17788975>

15. Kyiashko D. Development of a hybrid testing framework for multimodal systems based on AI agents. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. Вип. 11, № 52. С. 1774–1788. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11\(52\)-1774-1788](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-1774-1788)

References

1. Abd El-Hamid, M. M., Zaghloul, M. F., & Kolkila, A. A. E. A. (2024). Beyond fifth generation (5G) networks and better performance expectations for cellular wireless networks. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, 19(72), 150–166. <https://doi.org/10.21608/aej.2024.252471.1501>
2. Jiang, W., & Han, B. (2024). Evolution to fifth-generation (5G) mobile cellular communications. In *Cellular communication networks and standards: The evolution from 1G to 6G* (pp. 149–168). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57820-5_9
3. Al-Dujaili, M. J., & Al-Dulaimi, M. A. (2023). Fifth-generation telecommunications technologies: Features, architecture, challenges and solutions. *Wireless Personal Communications*, 128(1), 447–469. <https://doi.org/10.1007/s11277-022-09962-x>
4. Uzunidis, D., Moschopoulos, K., Papapavlou, C., Paximadis, K., Marom, D. M., Nazarathy, M., & Tomkos, I. (2023). A vision of 6th generation of fixed networks (F6G): Challenges and proposed directions. *Telecom*, 4(4), 758–815. <https://doi.org/10.3390/telecom4040035>
5. Migabo, E. M. (2024). The future of power supply design for next generation networks (5G and beyond) base stations. In *Proceedings of the 4th International Multidisciplinary Information Technology and Engineering Conference (IMITEC)* (pp. 383–389). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IMITEC60221.2024.10850977>
6. Hassan, A. N., Al-Chlahawi, S., & Khekan, A. R. (2021). Artificial intelligence techniques over the fifth generation (5G) mobile networks. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 24(1), 317–328. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v24.i1>
7. Harir, M. A. N., Ataro, E., & Nyah, C. T. (2025). Machine learning-based fifth-generation network traffic prediction using federated learning. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*, 16(1). <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2025.0160130>
8. Zhebka, V. (2024). Prohnozuvannia navantazhennia v heterohennykh telekomunikatsiinykh merezhakh na osnovi rozroblenoї neuronnoi modeli [Load forecasting in heterogeneous telecommunication networks based on a developed neural model]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika – Cybersecurity: Education, Science, Technology*, 2(26), 503–514. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.26.788>
9. Kravchenko, V. I. (2024). Pidvyshchennia yakosti heterohennykh telekomunikatsiinykh merezh za dopomohoiu rozpodilu resursiv na osnovi prohnoziv [Improving the quality of heterogeneous telecommunication networks through forecast-based resource allocation]. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnologii – Telecommunications and Information Technologies*, 1, 88–94. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.018894>
10. Zhebka, V. V., Nesterenko, K. S., & Zhebka, S. V. (2025). Metody upravlinnia stiikoiu heterohennoiu telekomunikatsiinoiu merezheiu v umovakh vplyvu destabilizuiuchykh chynnykiv [Methods of managing a resilient heterogeneous telecommunication network under destabilizing factors]. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnologii – Telecommunications and Information Technologies*, 1, 151–160. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.017512>
11. Vlasenko, V. O., Skliarenko, V. I., & Zub, O. V. (2024). Metodyka prohnozuvannia mobilnosti korystuvachiv u 5G-merezhakh [Methodology for forecasting user mobility in 5G networks]. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnologii – Telecommunications and Information Technologies*, 4, 136–141. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.041861>
12. Bershchanskyi, Y., Klym, H., & Shevchuk, Y. (2024). Containerized artificial intelligent system design in cloud and cyber-physical systems. *Advances in Cyber-Physical Systems*, 9(2), 151–157. <https://doi.org/10.23939/acps2024.02.151>
13. Opriskyi, I. R., Khokhlovachova, Yu. Ye., Stefankiv, A. V., & Shevchuk, Yu. A. (2025). Analiz tekhnichnykh osoblyvostei realizatsii shyfruvannia danykh na SD-kartakh v Android [Analysis of technical features of data encryption implementation on SD cards in Android]. *Suchasnyi zakhyst informatsii – Modern Information Security*, 1(61), 219–228. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2025.016526>
14. Doroshenko, M. (2025). Intelligent geographic information and management systems in modern logistics and digital infrastructures: Architectural, legal and security aspects. *Futurity Proceedings*, 5, 281–286. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17788975>
15. Kyiashko, D. (2025). Development of a hybrid testing framework for multimodal systems based on AI agents. *Nauka i tekhnika sohodni – Science and Technology Today*, 11(52), 1774–1788. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11\(52\)-1774-1788](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-1774-1788)

Дата першого надходження статті до видання: 16.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

В. О. РОМАНЕЦЬ

аспірант кафедри автоматизації
та інтелектуальних інформаційних технологій
Вінницький національний технічний університет
ORCID: 0009-0009-6075-0210

О. В. БІСІКАЛО

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації
та інтелектуальних інформаційних технологій
Вінницький національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-7607-1943

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ВІДЕОПОТОКУ ДОРОЖНЬОГО РУХУ НА ОСНОВІ EDGE-CLOUD АРХІТЕКТУРИ

У статті представлено розробку інформаційної технології інтелектуального аналізу відеопотоку дорожнього руху на основі гібридної Edge-Cloud архітектури. Технологія спрямована на забезпечення обробки даних у реальному часі, суттєве зменшення мережевого навантаження та підтримку автономної роботи периферійних пристроїв в умовах обмеженої пропускної здатності мереж. Запропоновано модульну структуру системи, що складається з чотирьох функціональних блоків: інтерфейс користувача, API-рівень, Edge-рівень та Cloud-рівень. Блоки взаємодіють через стандартизовані протоколи (REST, gRPC, MQTT, WebSocket), що забезпечує масштабованість, гнучкість та можливість незалежного розвитку компонентів.

Edge-рівень виконує повний пайплайн обробки відеопотоку безпосередньо на пристрої NVIDIA Jetson Orin Nano: детекцію об'єктів модифікованою моделлю YOLOv8-nano з модулями C3Ghost-CBAM, багатооб'єктний трекінг удосконаленим методом ByteTrack+ та виявлення аномалій дорожнього руху. До хмарного рівня передаються лише компактні метадані (координати, ідентифікатори треків, типи аномалій, статистика), що усуває потребу в передачі великих обсягів відео. Розроблено UML-діаграми послідовності для етапів ініціалізації системи та безперервної обробки відеопотоку, а також діаграму діяльності процесу навчання моделі детекції.

Програмна реалізація базується на сучасному стеку: Python 3.10+, PyTorch 2.1+, Ultralytics YOLOv8 з експортом у TensorRT (FP16/INT8), PostgreSQL з TimescaleDB, Redis для кешування та черг, FastAPI для REST/gRPC інтерфейсів, Docker для контейнеризації. Експериментальна оцінка підтвердила ефективність технології: економію мережевого трафіку на 98–99.8 % (з типових 4–6 Мбіт/с або $\approx 0,5$ –0,75 МБ/с на камеру при повному відеопотоці H.264 1080p@30fps до 8–15 КБ/с метаданих), швидкість обробки 55–75 FPS на Jetson Orin Nano з TensorRT та середнє значення MCC = 0,742 для виявлення аномалій.

Архітектура забезпечує високу модульність, масштабованість та стійкість до збоїв: Edge-пристрій автономно функціонує при втраті з'єднання з Cloud, зберігаючи події в локальному буфері з подальшою синхронізацією. Розроблена технологія має перспективне застосування в інтелектуальних транспортних системах, моніторингу дорожньої безпеки розумних міст та сценаріях з обмеженим доступом до широкосмужових мереж.

Ключові слова: інформаційна технологія, Edge-Cloud архітектура, комп'ютерний зір, детекція об'єктів, багатооб'єктний трекінг, виявлення аномалій, інтелектуальні транспортні системи, YOLOv8, ByteTrack, Jetson Orin Nano, TensorRT.

V. O. ROMANETS

Postgraduate Student at the Department of Automation
and Intelligent Information Technologies
Vinnytsia National Technical University
ORCID: 0009-0009-6075-0210

O. V. BISIKALO

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Automation
and Intelligent Information Technologies
Vinnytsia National Technical University
ORCID: 0000-0002-7607-1943



INFORMATION TECHNOLOGY FOR INTELLIGENT TRAFFIC VIDEO STREAM ANALYSIS BASED ON EDGE-CLOUD ARCHITECTURE

The paper presents the development of an information technology for intelligent analysis of road traffic video streams based on a hybrid Edge-Cloud architecture. The proposed solution is designed to enable real-time data processing, significantly reduce network load, and ensure autonomous operation of edge nodes under conditions of limited bandwidth.

The system is implemented as a modular structure comprising four main functional blocks: user interface, API layer, Edge layer, and Cloud layer. Each block performs clearly defined tasks and interacts via standardized protocols (REST, gRPC, MQTT, WebSocket), providing high scalability, flexibility, and the possibility of independent component evolution.

The Edge layer executes the complete video processing pipeline directly on the NVIDIA Jetson Orin Nano device. The pipeline includes object detection using a modified YOLOv8-nano model enhanced with C3Ghost-CBAM modules, multi-object tracking with an improved ByteTrack+ method, and anomaly detection in road traffic. Only compact metadata (bounding boxes, track IDs, anomaly types, statistics) are transmitted to the Cloud layer, eliminating the need to send large volumes of video data.

UML sequence diagrams were developed for the system initialization phase and continuous video stream processing, as well as an activity diagram for the object detection model training process.

The software implementation is based on a modern technology stack: Python 3.10+, PyTorch 2.1+, Ultralytics YOLOv8 with export to TensorRT (FP16/INT8 quantization), PostgreSQL with TimescaleDB extension for time-series data, Redis for caching and message queuing, FastAPI for REST/gRPC interfaces, and Docker for containerization.

Experimental evaluation confirmed the high efficiency of the technology: network traffic reduction of 98–99.8 % (from typical 4–6 Mbps or ≈ 0.5 – 0.75 MB/s per camera for full H.264 1080p@30fps video stream to 8–15 KB/s of JSON metadata), processing speed of 55–75 FPS on NVIDIA Jetson Orin Nano using TensorRT, and an average Matthews Correlation Coefficient (MCC) of 0.742 for anomaly detection.

The proposed architecture demonstrates strong modularity, scalability, and fault tolerance: the edge device can operate autonomously during temporary loss of Cloud connectivity, storing detected events in a local buffer and automatically synchronizing them upon connection restoration.

The developed technology shows strong potential for application in intelligent transportation systems (ITS), road safety monitoring in smart cities, and scenarios with constrained network bandwidth (4G/5G, remote areas).

Key words: *information technology, Edge-Cloud architecture, computer vision, object detection, multi-object tracking, anomaly detection, intelligent transportation systems, YOLOv8, ByteTrack, Jetson Orin Nano, TensorRT.*

Постановка проблеми

Системи відеоспостереження становлять основу сучасної інфраструктури забезпечення дорожньої безпеки, ефективного управління транспортними потоками та комплексного моніторингу транспортної мережі. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, щорічно внаслідок дорожньо-транспортних пригод гине близько 1,19 мільйона осіб, що робить питання автоматизації моніторингу дорожнього руху надзвичайно актуальним [1].

Однак значне зростання обсягів відеоданих, що надходять із розгалуженої мережі камер спостереження, створює значні труднощі для традиційних методів аналізу. Аномальні події є досить рідкісними – за різними оцінками, вони відбуваються менше ніж 1 % часу спостереження, що робить ручний моніторинг неефективним і ресурсозатратним процесом [2]. Традиційні підходи до аналізу відеопотоку передбачають передачу повного відеосигналу до централізованого сервера (від 3 до 6 Mbps на камеру для потоку 1080p@30fps з компресією H.264), що створює значне навантаження на мережеву інфраструктуру та підвищує латентність обробки [3].

Найважливішими проблемами, з якими стикається галузь, є: високі обчислювальні вимоги точних моделей детекції, що унеможливує їх використання на пристроях з обмеженими ресурсами [4]; недостатня стійкість методів багатооб'єктного трекінгу до оклюзій та перемикань ідентичності [5]; обмежена кількість спеціалізованих датасетів для виявлення аномалій у дорожньому русі [6, 7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

За останнє десятиліття інтерес до використання глибокого навчання у системах відеоспостереження значно зріс. Сімейство детекторів YOLO (You Only Look Once), розроблене Redmon та ін. [8], стало де-факто стандартом для детекції об'єктів у реальному часі. YOLOv8, представлений компанією Ultralytics у 2023 році [9], характеризується дуже добрим балансом між точністю та швидкістю інференсу, що сприяло його широкому застосуванню в задачах реального часу. Авторами у роботі [10] запропоновано модифіковану архітектуру YOLOv8, що дозволило зменшити кількість параметрів моделі (на 26 %) без суттєвого зниження якості детекції (менше 1 % mAP50), що дозволяє використовувати метод детекції у edge обробці.

У сфері багатооб'єктного трекінгу значним досягненням став метод ByteTrack [11], який використовує як високо-впевнені, так і низько-впевнені детекції для асоціації об'єктів, що суттєво підвищує стійкість до оклюзій. OC-SORT [12] доповнив цей підхід механізмами компенсації обсервації та віртуальних траєкторій. У роботі [13] автори запропонували модифікацію ByteTrack, що дозволила покращити якість трекінгу, за показниками MOTA та IDF, з мінімальною втратою швидкодії.

Концепція Edge-Cloud архітектури для систем комп'ютерного зору активно досліджується у роботах [14, 15]. Згідно з оглядом [14], edge computing дозволяє розміщувати обчислювальні вузли близько до джерел даних, що забезпечує суттєве зниження латентності завдяки уникненню передачі даних через мережу до віддаленої хмари – наприклад, час передачі кадру камери до хмари може перевищувати 200 мс, тоді як локальна обробка на edge значно скорочує цей показник і робить можливим реальний час обробки. Крім того, локальна обробка даних зменшує обсяг необхідного для передавання трафіку, що особливо важливо для bandwidth-інтенсивних застосувань, таких як аналіз відеопотоків з камер спостереження. Автори підкреслюють, що edge computing забезпечує автономну роботу систем у разі втрати з'єднання з хмарою, оскільки дані обробляються локально, що підвищує стійкість до мережових збоїв і дозволяє системі продовжувати функціонування без постійного доступу до центрального сервера. Додатковими перевагами є покращення приватності даних (обробка чутливої інформації не виходить за межі локального trusted edge-сервера) та масштабування системи без створення центральних вузьких місць у мережі. Однак питання оптимального розподілу функцій між Edge та Cloud рівнями для задач аналізу дорожнього руху залишається недостатньо дослідженим.

У роботі [16] запропонований фреймворк SAE-MCVT для трекінгу у реальному часі транспортних засобів у багатокамерних системах на базі edge computing. Автори пропонують розподілену архітектуру, де edge-пристрої обробляють відеопотоки локально через модулі детекції (YOLOv11n), трекінгу (ByteTrack) та екстракції ознак (ResNet-50), передаючи лише метадані до центрального сервера. Це забезпечує масштабованість для міського рівня, з IDF1-оцінкою 61.96 на датасеті RoundaboutHD, демонструючи ефективність у подоланні оклюзій та нелінійних траєкторій.

Робота [17] фокусується на семантичній edge-cloud комунікації для реального часу моніторингу трафіку в міських умовах з використанням ViT та LLM. Система детектує регіони інтересу (RoI) за допомогою YOLOv11 на edge пристрої, кодує їх у компактні вектори та передає до cloud для реконструкції зображень і генерації описів трафіку через LLaVA 1.5. Це зменшує обсяг даних на 99.9 %, забезпечуючи точність 89 % у мобільних мережах (з квантизацією для стійкості до помилок у каналах типу AWGN).

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розробка інформаційної технології інтелектуального аналізу відеопотоку дорожнього руху на основі Edge-Cloud архітектури, що забезпечує виявлення аномалій у реальному часі з мінімальним використанням мережових ресурсів та можливістю автономної роботи Edge-пристроїв.

Основними завданнями дослідження є: проектування загальної структури інформаційної технології з чітким розподілом функцій між Edge та Cloud рівнями; розробка UML-діаграм для формалізації процесів ініціалізації, обробки та навчання; вибір та обґрунтування технологічного стеку для програмної реалізації; експериментальна оцінка ефективності розробленої технології.

Викладення основного матеріалу дослідження

Проектування загальної структури інформаційної технології. Інформаційна технологія аналізу відеопотоку дорожнього руху реалізується як сукупність взаємопов'язаних модулів, згрупованих у чотири функціональні блоки: інтерфейс користувача, API-рівень, Edge-рівень та Cloud-рівень. Розрізнення блоків забезпечує масштабованість і гнучкість системи: обчислювальна частина на Edge-рівні може незалежно еволюціонувати від інтерфейсу користувача та хмарних шарів зберігання й аналітики. Загальна структурна схема розробленої інформаційної технології наведена на рис. 1.

Блок «Інтерфейс користувача» забезпечує взаємодію оператора з системою та включає: модуль налаштування ROI та калібрації камери (вхідні дані: координати зон інтересу, параметри калібрації, URL камер; вихідні дані: конфігураційний файл для Edge-рівня); модуль візуалізації (вхідні дані: агреговані треки, теплові карти, статистика; вихідні дані: візуальні елементи, експортовані звіти PDF/CSV).

Блок «API-рівень» забезпечує комунікацію між компонентами системи та включає: модуль аутентифікації та авторизації (JWT-токени з ролями: оператор, аналітик, адміністратор); модуль обробки запитів від Edge (валідація, фільтрація, нормалізація через gRPC/REST); модуль керування чергою завдань (Kafka/RabbitMQ); модуль моніторингу стану Edge-вузлів.

Блок «Edge-рівень» є базовим компонентом системи, на якому виконується повний пайплайн обробки відеопотоку. Структуру модулів Edge-рівня наведено в таблиці 1.

Блок «Cloud-рівень» забезпечує централізоване зберігання, аналітику та сповіщення: модуль агрегації даних з множини Edge-пристроїв; база даних PostgreSQL з розширеннями TimescaleDB (часові ряди) та PostGIS (геопросторові запити); аналітичний модуль (Web UI Dashboard); система сповіщення (email/SMS/Slack).

Розробка UML-діаграм інформаційної технології. Функціонування інформаційної технології складається з двох послідовних етапів: етапу ініціалізації та налаштування (виконується одноразово) та етапу безперервної обробки відеопотоку в режимі реального часу (виконується циклічно).

Етап ініціалізації виконується адміністратором системи один раз при встановленні камери або при зміні умов сцени. Мета цього етапу – визначити геометричні параметри сцени, провести калібрування камери та встановити

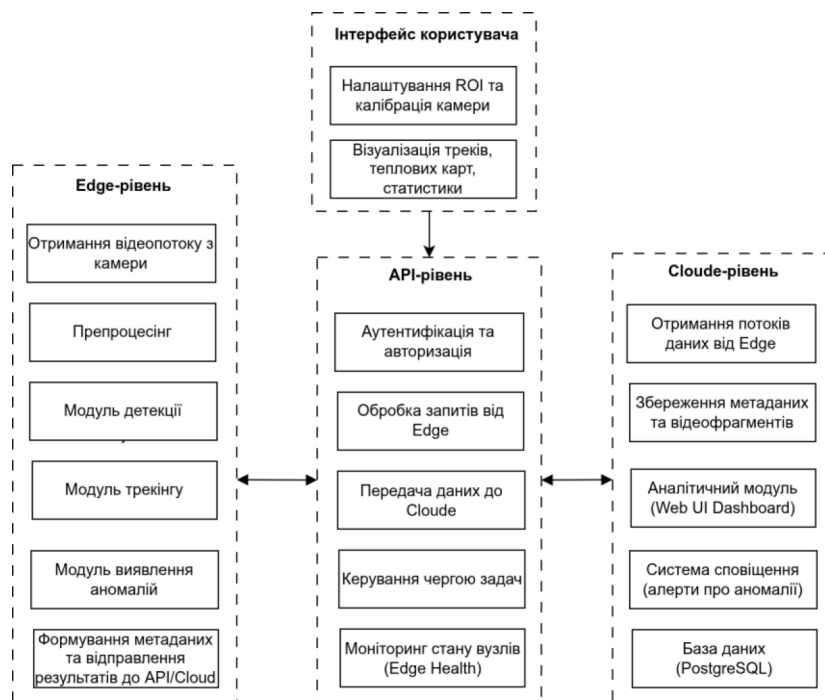


Рис. 1. Загальна структурна схема розробленої інформаційної технології аналізу відеопотоку дорожнього руху

Таблиця 1

Модулі Edge-рівня інформаційної технології

Модуль	Вхідні дані	Вихідні дані
Захоплення відеопотоку	RTSP/RTMP-потоки, локальні файли	Кадри з метаданими (timestamp, camera_id)
Препроцесінг	Сирі кадри	Нормалізовані кадри 640 × 640
Детекція (YOLOv8 + C3Ghost-CBAM) [10]	Препроцесовані кадри, ROI	Bounding boxes, класи, confidence
Трекінг (ByteTrack+) [13]	Детекції послідовних кадрів	Треки з track_id, швидкістю
Виявлення аномалій [6]	Треки, калібрація	Події за типом, timestamp
Формування метаданих	Треки, аномалії, статистика	JSON/Protobuf для Cloud

пороги для виявлення аномалій. UML-діаграма послідовності етапу ініціалізації включає наступні кроки: завантаження репрезентативного кадру; вибір опорних точок для гомографічного перетворення; визначення стоп-лінії, ROI перехрестя та зони світлофора; встановлення порогів (v_max, a_emergency, t_roi_max); генерація та збереження конфігураційного файлу.

Етап обробки відеопотоку виконується циклічно для кожного кадру. UML-діаграма послідовності включає взаємодію модулів: VideoCapture → Preprocessor → YOLOv8Detector → ByteTrackPlus → AnomalyDetector → MQTTPublisher.

UML-діаграма діяльності процесу навчання моделі детекції формалізує послідовність: підготовка датасету (11400 зображень) → конфігурація моделі YOLOv8-nano з C3Ghost-CBAM → навчання (100 епох, batch_size = 16) → валідація → експорт в ONNX → INT8-квантизація → тестування на Edge-пристрої.

Програмна реалізація інформаційної технології. Вибір програмних засобів здійснювався на основі критеріїв продуктивності, масштабованості, наявності документації та вартості. Порівняння фреймворків інференсу для Edge-рівня наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння фреймворків інференсу на Edge-пристрої

Фреймворк	FPS	RAM, ГБ	Розмір, МБ	Вибір
PyTorch Mobile	18–28	1.1–1.5	6	–
ONNX Runtime	15–22	0.8–1.2	12	–
TensorFlow Lite	20–30	0.6–1.0	8–10	–
TensorRT (float16)	46–65	0.8–1.2	10–15	✓
TensorRT (int8)	55–80	0.6–1.0	8–12	✓✓

За результатами аналізу та тестування на Jetson Orin Nano найкращим вибором для інференсу модифікованої моделі YOLOv8n визнано TensorRT (з квантизацією FP16 або INT8). Цей фреймворк забезпечує суттєво вищу швидкість обробки (55–75 FPS залежно від режиму квантизації), помірне споживання оперативної пам'яті (≈ 0.8 – 1.2 ГБ) та компактний розмір експортованої моделі (≈ 10 – 15 МБ). ONNX Runtime, хоча й демонструє стабільні 18–25 FPS у Python-реалізації, поступається TensorRT за продуктивністю на апаратній платформі NVIDIA Jetson. TensorRT також краще інтегрується з екосистемою NVIDIA (CUDA, cuDNN, TensorRT Execution Provider), що дозволяє досягти максимальної ефективності на Orin Nano. Технологічний стек Cloud-рівня включає: Python 3.10+, PyTorch 2.1+, Ultralytics YOLOv8 (з експортом у TensorRT), PostgreSQL з розширенням TimescaleDB для часових рядів, Redis для кешування та управління чергами, FastAPI (замість Flask) для REST/gRPC API, Docker + Docker Compose для контейнеризації та оркестрації.

Основною перевагою Edge-Cloud архітектури є економія мережевого трафіку. Порівняння обсягу даних наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Порівняння мережевого трафіку

Варіант передачі	На камеру	16 камер
Повний відеопотік H.264 1080p@30fps	3–6 Mbps (0.375–0.75 MB/s)	48–96 Mbps (6–12 MB/s)
Метадані JSON (запропоновано)	8–15 KB/s	128–240 KB/s
Економія трафіку	98–99.8 %	

Запропонований підхід забезпечує зменшення мережевого навантаження на 98–99.8 % (залежно від інтенсивності трафіку та кількості об'єктів на кадру), що робить систему придатною для розгортання в умовах обмеженої пропускної здатності мереж (наприклад, у віддалених районах або при використанні 4G/5G). Додатковою перевагою є автономність Edge-пристрою при втраті з'єднання з Cloud: система продовжує виявляти та локально зберігати аномалії у буфері MQTT (до 10000 подій) з подальшою синхронізацією протягом 15–30 секунд після відновлення з'єднання.

Висновки

У роботі розроблено інформаційну технологію інтелектуального аналізу відеопотоку дорожнього руху на основі Edge-Cloud архітектури. Технологія реалізована як модульна система, що складається з чотирьох функціональних блоків: інтерфейс користувача, API-рівень, Edge-рівень та Cloud-рівень. Кожен блок виконує чітко визначені функції та забезпечує взаємодію через стандартизовані протоколи (REST/gRPC, MQTT, WebSocket), що гарантує масштабованість, гнучкість та легкість інтеграції.

Edge-рівень виконує повний пайплайн обробки відеопотоку в реальному часі безпосередньо на периферійному пристрої NVIDIA Jetson Orin Nano, включаючи:

- детекцію об'єктів модифікованою моделлю YOLOv8-nano з модулями C3Ghost-CBAM;
- багатооб'єктний трекінг удосконаленим методом ByteTrack+;
- виявлення чотирьох типів аномалій дорожнього руху.

До Cloud-рівня передаються лише метадані (координати, ідентифікатори треків, типи аномалій, статистика), що суттєво зменшує мережеве навантаження.

Експериментально підтверджено високу ефективність розробленої технології:

- досягнуто економії мережевого трафіку на 98–99.8 % (з типових 4–6 Mbps або ≈ 0.5 – 0.75 MB/s на камеру при повному відеопотоці H.264 1080p@30fps до 8–15 KB/s метаданих JSON);
- забезпечено швидкість обробки 55–75 FPS (залежно від режиму квантизації FP16/INT8) на NVIDIA Jetson Orin Nano при використанні TensorRT;
- отримано середнє значення коефіцієнта кореляції Метьюза (MCC) = 0.742 для виявлення аномалій, зокрема: проїзд на червоний сигнал – 0.861, перевищення швидкості – 0.758, аварійне гальмування – 0.515, перебування в зоні ROI – 0.834.

Запропонована архітектура характеризується високим рівнем модульності, масштабованості та стійкості до збоїв: Edge-пристрій здатний автономно працювати при тимчасовій втраті з'єднання з Cloud, зберігаючи виявлені аномалії в локальному буфері (до 10 000 подій) з подальшою автоматичною синхронізацією після відновлення зв'язку.

Отримані результати свідчать про перспективність використання гібридної Edge-Cloud архітектури для побудови сучасних інтелектуальних транспортних систем, особливо в умовах обмеженої пропускної здатності мереж, високих вимог до реального часу обробки та необхідності забезпечення автономності периферійних вузлів.

Розроблена технологія може бути основою для подальшого масштабування на багатокамерні системи, інтеграції з V2X-протоколами, а також розширення функціоналу на виявлення додаткових типів аномалій та прогнозування дорожніх ситуацій.

Список використаної літератури

1. World Health Organization. Global status report on road safety 2023. Geneva : WHO, 2023. 81 p. ISBN 978-92-4-008651-7. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240086517> (дата звернення: 09.02.2026).
2. Duong H.-T., Le V.-T., Hoang V. T. Deep learning-based anomaly detection in video surveillance: A survey // *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 11. Art. 5024. DOI: 10.3390/s23115024.
3. Human-Centric Anomaly Detection in Surveillance Videos Using YOLO-World and Spatio-Temporal Deep Learning [Електронний ресурс] / arXiv. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2510.22056> (дата звернення: 09.02.2026).
4. What are the challenges of AI image processing on edge devices? [Електронний ресурс] / Tencent Cloud. 2025. URL: <https://www.tencentcloud.com/techpedia/125406> (дата звернення: 09.02.2026).
5. Advancing multi-object tracking through occlusion-awareness and trajectory optimization // *Knowledge-Based Systems*. 2025. Vol. 310. Art. 112930. DOI: 10.1016/j.knosys.2024.112930.
6. Романець В., Маслій Р. В. Виявлення аномалій у відеопотоці трафіку транспорту засобами комп'ютерного зору та глибинного навчання // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2025. Вип. 5. С. 146–155.
7. Pradeep Kumar P., Kant K. TU-DAT: A computer vision dataset on road traffic anomalies // *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 11. Art. 3259. DOI: 10.3390/s25113259. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/11/3259> (дата звернення: 09.02.2026).
8. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You only look once: Unified, real-time object detection // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016. P. 779–788.
9. Jocher G., Chaurasia A., Qiu J. Ultralytics YOLOv8 [Електронний ресурс]. 2023. URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (дата звернення: 09.02.2026).
10. Романець В., Бісікало О. Виявлення об'єктів дорожнього руху з камер відеоспостереження // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2025. Т. 355, № 4. С. 491–497. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-355-70
11. Zhang Y., Sun P., Jiang Y. et al. ByteTrack: Multi-object tracking by associating every detection box // *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*. 2022. P. 1–21. DOI: 10.1007/978-3-031-20047-2_1
12. Cao J., Weng X., Khiroudkar R. et al. Observation-centric SORT: Rethinking SORT for robust multi-object tracking // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2023. P. 9686–9696.
13. Романець В., Бісікало О. Метод багатооб'єктного трекінгу з обробкою оклюзій для систем відеоспостереження // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2025. Т. 84, № 4. С. 440–445. DOI: 10.31891/2219-9365-2025-84-53
14. Chen J., Ran X. Deep learning with edge computing: A review // *Proceedings of the IEEE*. 2019. Vol. 107, No. 8. P. 1655–1674. DOI: 10.1109/JPROC.2019.2921977
15. Wang X., Han Y., Leung V. C. M., Niyato D., Yan X., Chen X. Convergence of edge computing and deep learning: A comprehensive survey // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2020. Vol. 22, No. 2. P. 869–904. DOI: 10.1109/COMST.2020.2970550
16. Lin Y., Lockyer S., Stanek F., Zarbock M., Evans A., Li W., Zhang N. SAE-MCVT: A Real-Time and Scalable Multi-Camera Vehicle Tracking Framework Powered by Edge Computing [Електронний ресурс] / arXiv. 2025. arXiv:2511.13904v1. URL: <https://arxiv.org/pdf/2511.13904> (дата звернення: 09.02.2026).
17. Onsu M. A., Lohan P., Kantarci B., Syed A., Andrews M., Kennedy S. Semantic Edge–Cloud Communication for Real-Time Urban Traffic Surveillance with ViT and LLMs over Mobile Networks [Електронний ресурс] / arXiv. 2025. arXiv:2509.21259v1. URL: <https://arxiv.org/pdf/2509.21259> (дата звернення: 09.02.2026).

References

1. World Health Organization. (2023). Global status report on road safety 2023. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240086517>.
2. Duong, H.-T., Le, V.-T., & Hoang, V. T. (2023). Deep learning-based anomaly detection in video surveillance: A survey. *Sensors*, 23(11), Article 5024. <https://doi.org/10.3390/s23115024>
3. Human-centric anomaly detection in surveillance videos using YOLO-World and spatio-temporal deep learning. (2025). *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2510.22056>
4. What are the challenges of AI image processing on edge devices? (2025). Tencent Cloud. <https://www.tencentcloud.com/techpedia/125406>
5. Advancing multi-object tracking through occlusion-awareness and trajectory optimization. (2025). *Knowledge-Based Systems*, 310, Article 112930. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.112930>
6. Romanets, V., & Masliy, R. V. (2025). Vyyavlennya anomalii u videopototsi trafiku transportu zasobamy komp'yuternoho zoru ta hlybynnoho navchannya [Anomaly detection in traffic video streams using computer vision and deep learning]. *Visnyk Vinnyts'koho Politekhnicznego Instytutu*, (5), 146–155.

7. Pradeep Kumar, P., & Kant, K. (2025). TU-DAT: A computer vision dataset on road traffic anomalies. *Sensors*, 25(11), Article 3259. <https://doi.org/10.3390/s25113259>
8. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 779–788).
9. Jocher, G., Chaurasia, A., & Qiu, J. (2023). Ultralytics YOLOv8 [Computer software]. GitHub. <https://github.com/ultralytics/ultralytics>.
10. Romanets, V., & Bisikalo, O. (2025). Vvyavlennya ob'ektiv dorozhn'oho rukhu z kamer videosposterezhennya [Detection of road traffic objects from surveillance cameras]. *Visnyk Khmel'nyts'koho Natsional'noho Universytetu. Tekhnichni Nauky*, 355(4), 491–497. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-70>
11. Zhang, Y., Sun, P., Jiang, Y., et al. (2022). ByteTrack: Multi-object tracking by associating every detection box. In *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)* (pp. 1–21). https://doi.org/10.1007/978-3-031-20047-2_1
12. Cao, J., Weng, X., Khirodkar, R., et al. (2023). Observation-centric SORT: Rethinking SORT for robust multi-object tracking. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 9686–9696).
13. Romanets, V., & Bisikalo, O. (2025). Metod bahatoob'yektnoho trekingu z obrobkoyu oklyuziy dlya system videosposterezhennya [Method of multi-object tracking with occlusion handling for surveillance systems]. *Vymiryuval'na ta Obchyslyuval'na Tekhnika v Tekhnolohichnykh Protsesakh*, 84(4), 440–445. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-53>
14. Chen, J., & Ran, X. (2019). Deep learning with edge computing: A review. *Proceedings of the IEEE*, 107(8), 1655–1674. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2921977>
15. Wang, X., Han, Y., Leung, V. C. M., Niyato, D., Yan, X., & Chen, X. (2020). Convergence of edge computing and deep learning: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(2), 869–904. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2970550>
16. Lin, Y., Lockyer, S., Stanek, F., Zarbock, M., Evans, A., Li, W., & Zhang, N. (2025). SAE-MCVT: A real-time and scalable multi-camera vehicle tracking framework powered by edge computing. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2511.13904>
17. Onsu, M. A., Lohan, P., Kantarci, B., Syed, A., Andrews, M., & Kennedy, S. (2025). Semantic edge–cloud communication for real-time urban traffic surveillance with ViT and LLMs over mobile networks. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2509.21259>

Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

УДК 004.8, 004.056, 004.75, 005.21

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.1.42>**І. П. СІНЦІН**

доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент Національної академії наук України, директор
Інститут програмних систем Національної академії наук України
ORCID: 0000-0002-4120-0784

О. П. ІЛЬІНА

кандидат фізико-математичних наук,
провідний науковий співробітник
Інститут програмних систем Національної академії наук України
ORCID: 0000-0002-4073-9649

С. Я. СКИБИК

аспірант
Інститут програмних систем Національної академії наук України
ORCID: 0009-0008-4336-680X

О. А. ЯЦЕНКО

старший науковий співробітник
Інститут програмних систем Національної академії наук України
ORCID: 0000-0002-4700-6704

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ АДАПТИВНОГО АНСАМБЛЕВОГО ІНДИКАТОРУ ДІАГНОСТИКИ СТРАТЕГІЧНОЇ РЕСУРСНОЇ БЕЗПЕКИ РОЗПОДІЛЕНОЇ ОРГАНІЗАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

У статті представлено результати дослідження властивостей адаптивного ансамблевого індикатора діагностики стратегічної ресурсної безпеки (ДСРБ) розподіленої організаційної системи, призначеного для підтримки прийняття рішень в умовах високої невизначеності, неповноти інформації та дисбалансу спостережень. Індикатор реалізовано на основі гетерогенного ансамблю бінарних класифікаторів, що поєднує моделі різних парадигм машинного навчання (Naive Bayes, Support Vector Machine, Random Forest, k-Nearest Neighbors, Logistic Regression), та доповнено спеціалізованими механізмами масштабування, калібрування ймовірностей і адаптивного зважування результатів. Актуальність дослідження зумовлена специфікою ресурсних даних у системах стратегічного управління, для яких характерні складні та асиметричні розподіли ознак, часові лаги, висока неоднорідність умов спостереження, домінування благополучних станів та критичність ризику гіподіагностики неблагополучних ситуацій. З урахуванням цих особливостей у роботі запропоновано композитну метрику якості KQ , що інтегрує показники $F1neg$, коефіцієнт Метьюза та каппу Коена з урахуванням їхньої взаємної корельованості та управлінських пріоритетів. Дослідження виконано у формі серії обчислювальних експериментів із використанням спеціально згенерованих синтетичних наборів даних, які імітують доменно обумовлену статистичну поведінку ресурсних спостережень, зокрема наявність важких «хвостів» розподілів, шуму міток, класового дисбалансу та впливу ресурсної передісторії. Для цього розроблено уніфікований алгоритм супроводження обчислювального експерименту, що забезпечує відтворюваність, порівнянність результатів і статистичну валідацію ефектів. У межах трьох експериментів проведено базову верифікацію алгоритму, поетапний аналіз внеску окремих механізмів у показники якості та оцінювання ефективності ансамблю в стресових умовах порівняно з найкращим окремим класифікатором. Отримані результати свідчать про стійку перевагу ансамблевого індикатора ДСРБ за композитною метрикою якості, показниками специфічності та $F1neg$, що підтверджено статистично значущими парними тестами та оцінками розміру ефекту. Показано, що запропонований підхід забезпечує більш надійне виявлення потенційно небезпечних ресурсних станів та формує інтерпретовану основу для підтримки стратегічних управлінських рішень у розподілених організаційних системах.

Ключові слова: класифікація методами машинного навчання, гетерогенний ансамбль класифікаторів, адаптивна метрика якості, дисбаланс класів, специфічність (ризик гіподіагностики), м'яке голосування, підтримка стратегічних рішень.



I. P. SINITSYN

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Director
Institute of Software Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0002-4120-0784

O. P. ILINA

PhD (Phys.-Math.), Senior Researcher
Institute of Software Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0002-4073-9649

S. Ya. SKYBYK

Postgraduate Student
Institute of Software Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0009-0008-4336-680X

O. A. YATSENKO

Senior Researcher
Institute of Software Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0002-4700-6704

MODELING AND EVALUATION OF THE PROPERTIES OF AN ADAPTIVE ENSEMBLE INDICATOR FOR DIAGNOSING THE STRATEGIC RESOURCE SECURITY OF A DISTRIBUTED ORGANIZATIONAL SYSTEM

The paper presents the results of a study of the properties of an adaptive ensemble indicator for diagnosing the strategic resource security (DSRS) of a distributed organizational system, intended to support decision-making under conditions of high uncertainty, incomplete information, and class imbalance. The indicator is implemented as a heterogeneous ensemble of binary classifiers combining machine learning models of different paradigms (Naive Bayes, Support Vector Machine, Random Forest, k-Nearest Neighbors, Logistic Regression) and is supplemented with specialized mechanisms for feature scaling, probability calibration, and adaptive weighting of model outputs. The relevance of the study is determined by the specific nature of resource data in strategic management systems, which are characterized by complex and asymmetric feature distributions, temporal lags, high heterogeneity of observation conditions, dominance of satisfactory states, and the critical importance of minimizing the risk of hypodiagnosis of unfavorable situations. Taking these characteristics into account, the paper proposes a composite quality metric KQ that integrates the $F1_{neg}$ score, the Matthews correlation coefficient, and Cohen's kappa, while considering their mutual correlations and domain-specific managerial priorities. The research is conducted through a series of computational experiments using specially generated synthetic datasets that reproduce domain-driven statistical properties of resource observations, including heavy-tailed distributions, label noise, severe class imbalance, and the influence of historical resource dynamics. For this purpose, a unified framework for managing computational experiments is developed, ensuring reproducibility, comparability of results, and statistical validation of observed effects. Within three experimental studies, the algorithm is subjected to baseline verification, a stepwise analysis of the contribution of individual mechanisms to classification quality, and an evaluation of ensemble performance under stress conditions in comparison with the best-performing individual classifier. The results demonstrate a stable advantage of the proposed ensemble DSRS indicator in terms of the composite quality metric, specificity, and $F1_{neg}$ score, which is confirmed by statistically significant paired tests and effect size estimates. It is shown that the proposed approach provides more reliable detection of potentially dangerous resource states and forms an interpretable basis for supporting strategic decision-making in distributed organizational systems.

Key words: machine learning-based classification, heterogeneous ensemble of classifiers, adaptive quality metric, class imbalance, specificity (risk of hypodiagnosis), soft voting, strategic decision support.

Постановка проблеми

Призначенням індикатору діагностики стратегічної ресурсної безпеки (ДСРБ) є виявлення таких поточних станів ресурсної ситуації в розподіленій організаційній системі (РОС), які становлять потенційну небезпеку для її стратегічних цілей.

У попередній роботі [1] було розглянуто доцільний спосіб формалізації такого індикатору, оснований на застосуванні великого обсягу ресурсних спостережень за елементами організаційної системи та експертними оцінками

стану стратегічних цілей. Пропонована формалізація використовує машинне навчання ансамблю бінарних класифікаторів. Він є максимально диверсифікованим за парадигмами репрезентованих моделей та адаптивно налаштовуваним на динамічну актуалізацію знань про статистичну поведінку ресурсних даних. Такий підхід орієнтований на використання індикатору за умов глибокої невизначеності стратегічних управлінських процесів [2].

На основі аналізу структурних та процесних аспектів предметної області, попередньо здійсненого в [3], були виявлені статистичні особливості даних та пріоритети їх аналізу, що визначають актуальні вимоги до властивостей індикатору.

Метою даного дослідження була організація, проведення та аналіз результатів обчислювальних експериментів, спрямованих на дослідження актуальних властивостей індикатора ДСРБ в умовах можливих форм статистичної поведінки вхідних даних та наявних управлінських пріоритетів.

Алгоритм індикатору ДРСБ проєктувався як відповідь на низку викликів, характерних для ресурсних даних індикатора та контексту прийняття рішень. Ці виклики були систематизовані у вигляді множини факторів Ф1–Ф11:

Ф1. Різноманітність ознак за типами (ресурсні, лагові, службові) та шкалами вимірювання.

Ф2. Складність розподілів (обмеженість області, скупченість, правосторонні «хвости»).

Ф3. Залежність поточного стану від ресурсної передісторії (інерційність процесів, часові лаги).

Ф4. Високий дисбаланс на користь позитивного (нормального) класу.

Ф5. Критичність гіподіагностики незадовільних станів (пропуск негативних станів є набагато небезпечнішим, ніж хибна тривога).

Ф6. Наявність нефіксованих зовнішніх факторів впливу, які можуть змінювати розподіли без прямого спостереження.

Ф7. Неоднорідність умов спостережень у часі та між різними підмножинами даних.

Ф8. Епізоди оцінювання цільової змінної за відмінними експертними моделями та шкалами.

Ф9. Обмежений обсяг доступних даних у порівнянні з потенційною складністю простору ознак.

Ф10. Використання різних типів класифікаційних моделей (імовірнісних, геометричних, деревоподібних) в одному ансамблі.

Ф11. Вимога придатності результатів класифікації для практичної підтримки рішень організаційної системи.

Призначення ДСРБ для процесів підтримки прийняття рішень в розподіленій організаційній системі розглядуваного типу акцентується на таких задачах:

- розпізнання ситуації, в якій ДСРБ може бути достатнім підґрунтям для прийняття рішення, та здійснення обґрунтованого прогнозу її стратегічної безпечності;

- отримання обґрунтованих гіпотез щодо потенційних ресурсних ризиків за умов високого рівня невизначеності;

- надання критерію для порівняльного аналізу послідовності періодів оперативного управління організаційною системою в аспекті стратегічної ресурсної небезпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Використання ансамблів класифікаторів та дослідження їх ефективності для заданих типів задач та певної предметної області становить тематику багатьох сучасних досліджень [4]. Такі дослідження стосуються ансамблів різної структурної організації (гомогенних та гетерогенних), а також різних способів їх побудови (статичного або динамічного) [5]. Серед предметних областей, для яких незмінно актуальними є дослідження в області ансамблевої класифікації, привертають увагу медико-біологічна сфера [6], проблематика управління й підтримки прийняття рішень [7], а також кібербезпеки [8]. Задачі, в яких використовується такий інструментарій, стосуються по більшості діагностики станів систем та визначення пріоритетних об'єктів вибору або втручання [9].

Серед властивостей ансамблю, які привертали інтерес дослідників, найчастіше представлені стандартні характеристики результатів в різних аспектах матриці помилок та показники стабільності [10]. Для дослідження валідності та перспективності наданого ансамблем інструментарію діагностики за умов, характерних для предметної області використання, в якості інформаційних об'єктів дослідження використовувалися як стандартні набори даних, представлені у відкритому доступі, так і синтетичні набори даних [11].

Окремий аспект методичного та інструментального ракурсу досліджень складає організація та підтримка відповідних обчислювальних експериментів [12].

Таким чином, має місце доменна орієнтованість досліджень в області ефективного ансамблювання класифікаторів. Це повною мірою стосується вивчення властивостей ансамблю за допомогою обчислювальних експериментів із генерацією даних, що імітують статистичну поведінку спостережень за об'єктами й процесами певної предметної області [13].

Об'єкти та процеси предметної області управління ресурсною безпекою стратегії розподілених організаційних систем були розглянуті раніше в [1]. Одну із найважливіших репрезентацій відповідної організаційної системи становить організаційна інфраструктура воєнної сфери національної безпеки. Дані ресурсних спостережень у цій області, які можуть використовуватися індикатором ДСРБ, мають спеціалізований статистичний характер

у зв'язку з процесами предметної області [14], [15]. Додатковий внесок до такої специфіки роблять використовувані регламенти спостережень та система пріоритетів, прийнята в процесах прийняття рішень [3].

Основними чинниками впливу виступають:

- різноманітність та динамічність поточних станів ресурсів різних типів;
- оцінювання задовільності ресурсного стану в долях від нормативів різної природи (за типом об'єкту управління, за делегованими спроможностями, за завданнями поточної ситуативної та антикризової діяльності);
- значна різниця в інтервалах спостережень за станом стратегічних цілей та за ресурсним станом об'єктів;
- високий дисбаланс класів з домінуванням благополучних станів;
- переважаюча ціна гіподіагностики міноритарного неблагополучного класу.

Все це обґрунтовує актуальність задачі дослідження ефективності пропонованого ансамблю класифікаторів за умов, близьких до практик його використання, за допомогою відповідних обчислювальних експериментів.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є визначення параметрів та властивостей запропонованого в [1] алгоритму індикатору ДСРБ, актуальних для його відповідного використання, та проведення обчислювальних експериментів щодо результативності алгоритму в аспекті цих характеристик.

Викладення основного матеріалу дослідження

Опис об'єкту експериментальних досліджень. Об'єктом досліджень є алгоритм індикатору ДСРБ, що здійснює підтримку машинного навчання та прогнозу стану стратегічних цілей РОС на основі даних про ресурсну забезпеченість її елементів. Алгоритм характеризується наступними рисами:

- 1) базується на ансамблі бінарних класифікаторів у складі: Naive Bayes (NB), Support Vector Machine (SVM), Random Forest (RF), k-Nearest Neighbors (kNN) та Logistic Regression (LR);
- 2) використовує синтетичні набори даних спеціальної структури.

Кожен з таких наборів даних:

- включає множину ресурсних ознак, вибірки значень яких імітують один із варіантів доменно обумовленої статистичної картини результатів спостережень за станом ресурсів елементів РОС [13];
- надає значення бінарної мітки благополучності стратегічного стану РОС, кожне з яких відповідає певному підперіоду зі складу періоду спостережень;
- містить лагові ознаки, які забезпечують синхронізацію даних за приналежністю до підперіодів;
- репрезентує як ознаки, корельовані з міткою, так і іррелевантні до неї.

Алгоритм ДСРБ визначає процес, до якого входять етапи:

E1. Структуризація системи ознак та масштабування.

E2. Навчання моделей ансамблю.

E3. Статичне зважування внесків моделей.

E4. Побудова динамічної метрики якості класифікації.

E5. Прогнозна інтегрована класифікація для спостережень тестової вибірки.

Докладний розгляд алгоритму було здійснено в [1].

Специфічні механізми, включені до складу алгоритму для відповіді на виклики Ф1–Ф11, розглянуті у постановці проблеми, охарактеризовані в табл. 1.

На основі призначення індикатору, розглянутого в постановці проблеми, до властивостей ДСРБ, що потребують вивчення за допомогою обчислювального експерименту, доцільно віднести:

- досягнуте значення інтегрального показника якості класифікації, оснований в алгоритмі ДСРБ на трьох взаємодоповнюючих критеріях [1];
- внесок спеціалізованих механізмів зі складу алгоритму ДСРБ, оцінюваний впливом на показники якості прогнозованої класифікації;
- критерій ризику недовиявлення негативних ресурсних ситуацій – показник Specificity

$$Spec = TN / (TN + FP) \quad (1)$$

обчислюється на основі елементів матриці помилок, являючи собою відношення числа істинно негативних класифікацій до суми істинно негативних та хибно позитивних;

- оцінку відносної ефективності ансамблю за інтегральним показником та критерієм ризику (1) в зіставленні з результатами окремих класифікаторів із його складу (особливо за умов невизначеності, при недостатніх для категоричного прийняття рішень значеннях критерію якості).

Вхідний набір даних алгоритму має структуру, модель якої ґрунтується на наступних параметрах та ознаках. Прийемо ряд позначень:

- TP – довжина періоду планової актуальності поточної стратегії РОС;
- DT – довжина підперіодів, наприкінці яких здійснюється оцінювання благополучності стану стратегічних цілей;

Таблиця 1

Втілені в алгоритмі ДСРБ методичні рішення

Виклики	Втілені в алгоритмі методичні рішення	Аргументація доцільності
Ф1	Розрізняння ресурсних та лагових ознак	Різний препроцесинг для запобігання мультиколінеарності
Ф1, Ф3	Видалення спостережень з пропуском лагів та kNN доповнення ресурсних	Збереження послідовностей
Ф1, Ф2, Ф6, Ф10	Робастне масштабування ресурсних ознак в LR, kNN, SVM з використанням медіани та інтерквартильного розмаху (IQR) замість середнього та дисперсії (без зважування класів та видалення корельованих ознак)	Забезпечення однорідності ознак за шкалами та, що найважливіше, зменшення деструктивного впливу аномальних викидів, характерних для «важких хвостів» логнормальних розподілів
Ф4, Ф6, Ф7, Ф8	5 фолдів з почерговим використанням в ролі тестового	Стабільність оцінки якості
Ф4, Ф5	Априорна метрика якості KQ_i для моделі M_i : зважена сума адаптованих критеріїв F1 (з інверсією класів), MCC та Каппа (перенормованої)	Акцент на виявленні негативних станів, баланс аспектів якості, зіставність
Ф10	Навчання M_i з крос-валідаційним калібруванням ймовірностей за методом Платта [16]	Отримання достовірних та уніфікованих імовірностей
Ф2, Ф3, Ф6, Ф10	Визначення коефіцієнтів довіри (KDR)	Регуляція впливу моделей згідно вразливості до властивостей спостережень, ще до етапу оцінки їхньої емпіричної точності
Ф3, Ф4, Ф5	Урахування фактичної корельованості елементів KQ_i для динамічної вагової параметризації з отриманням KQD_i для M_i	Адаптивна та об'єктивна оцінка якості, що пріоритезує міноритарний клас і запобігає домінуванню колінеарних метрик
Ф2, Ф3, Ф5, Ф10	Вагові коефіцієнти моделей M_i для наступного використання в голосуванні	Інтеграція вразливості M_i з продемонстрованою якістю
Ф10	Прогноз індивідуальних (від M_i) імовірностей класів для тестових точок	Зіставність M_i – прогнозів завдяки попереднім крокам
Ф2, Ф4, Ф6, Ф7, Ф8, Ф9	Інтеграція індивідуальних прогнозів для точок тестової вибірки зваженим м'яким голосуванням [16]	Підвищення впливу переваг, запобігання переоцінці більшого класу, агрегація розмитих рішень при складних розподілах ознак
Ф11	Оптимальна порогова дискретизація результатів класифікації (границя між класами встановлюється як значення ймовірності, яке максимізує KQD в точках тестової вибірки)	Створення можливості порівняння прогнозу класу з фактичними значеннями для тестової вибірки з метою наступної оцінки властивостей індикатору

- NT – номер такого підперіоду;
 - $L(NT) \in \{0,1\}$ – значення бінарної мітки благополучності стану стратегічних цілей для підперіоду з номером NT ;
 - NR – число планованих ресурсних спостережень в межах кожного з підперіодів.
- Тоді модель набору даних має наступний вигляд

$$DS = \{(FNT_i, L_i(NT_i), FH_i(NT_i), \{FR_{ij}\}_{j=1,\dots,R})\}_{i=1,\dots,NO}, \quad (2)$$

де FNT_i – номер підперіоду, до якого належить i -те спостереження; $L_i(NT_i)$ – мітка відповідного підперіоду; $FH_i(NT_i)$ – число підперіодів, що безпосередньо передують NT_i -му, в яких значення мітки співпадають з L_i ; FR_{ij} – доля нормативного значення ресурсу j -го виду, наявна на момент спостереження; R – число видів ресурсу; NO – кількість ресурсних спостережень.

Дві лагові ознаки FNT та FH забезпечують можливість впорядкування спостережень та врахування передісторії.

Алгоритм та засоби підтримки обчислювального експерименту. Для проведення обчислювальних експериментів із дослідження властивостей індикатору ДСРБ за умов різних статистичних моделей ресурсної ситуації був розроблений уніфікований алгоритм супроводження обчислювальних експериментів (COE). До його задач належать:

- створення єдиного інформаційного середовища проведення експериментів;
- формування вхідних наборів даних, що відповідають моделі імітованої ресурсної ситуації та її стратегічних наслідків;
- відповідна параметризація звернень до бібліотечних процедур класифікаційних моделей елементів ансамблю;
- вибіркове включення до складу досліджуваного алгоритму ДСРБ механізмів, охарактеризованих в табл. 1, та параметризація процедур їх реалізації;
- управління експериментом (запуск, контроль, логування);
- систематизація, узагальнення та аналіз результатів;
- візуалізація результатів.

Алгоритм COE реалізує наступну етапність процесу проведення експерименту.

Етап 1. Генерація батьківських вибірок.

Визначення структурних і об'ємних параметрів набору даних, видів і параметрів розподілу, характеристик шуму для міток та ознак, параметрів генерації. Виконання генерації.

Етап 2. Формування вхідних наборів даних.

Генерація послідовності міток благополучності підперіодів. Формування вибірок лагових ознак. Вибір та параметризація методів наповнення вибірок PT_i ресурсних ознак для i -го підперіоду добором значень із відповідних батьківських вибірок.

А) Пороговий метод, при якому умовою добору елементів до формованої вибірки має вид

$$((L_i = k) \wedge (|H| = m)) \Rightarrow \forall x \in PT_i : F_k(x, p, m), \quad (3)$$

де L_i – значення мітки в підперіоді; H – множина безпосередньо попередніх підперіодів з таким самим її значенням; $|H| = m$ – довжина періоду стабільності мітки; PT_i – множина елементів (спостережень), що належать підперіоду i ; F_0, F_1 – відповідно, предикати приналежності до періодів із міткою 0 або 1, що визначають порогові умови співвідношення між елементом x , параметрами розподілу ознаки p та довжиною періоду стабільності m .

Б) Зважений імовірнісний відбір значень, оснований на використанні контекстно залежної функції $S(x)$ корисності елементів x , взятих із батьківської вибірки.

До підперіодів із $L = 1$ відбір здійснюється з імовірністю p , а для $L = 0$ – з імовірністю $1 - p$. При цьому

$$p = 1 + \exp(-k \cdot S(x)), \quad (4)$$

$$S(x) = (\alpha c(x) + \beta t(x) + \gamma(2Lpr - 1))u(r) - \delta t(x)(1 - c(x)) + b, \quad (5)$$

де складові функції $S(x)$ відповідають метрикам корисності елемента x : $c(x)$ – міра близькості значення ознаки до 1; $t(x)$ – міра належності елемента до правого «хвоста» розподілу; $u(r)$ – функція значимості довжини періоду стабільності H (визначена в (3)).

Інші параметри в (4), (5) відображують пріоритет аспектів корисності.

Етап 3. Здійснення відбору механізмів.

До механізмів з табл. 1, які можуть бути чи не бути включені до складу алгоритму ДСРЗ, належать:

- використання в ролі базового показника якості класифікації критерію Каппа Коена;
- запровадження композитної метрики якості KQ , ґрунтованої на критеріях $F1_{neg}$ ($F1$, інвертованого щодо основного класу [17]), MCC та Каппа Коена (з апіорними вагами критеріїв або з динамічно налаштовуваними);
- форма інтеграції результатів різних моделей (за допомогою дискретного зваженого голосування або засобами ймовірнісного голосування – зі статичними апіорними вагами або адаптовними, а також із апіорними порогоми дискретизації результату чи з оптимізованими);
- калібрування моделей класифікаторів при навчанні.

Етап 4. Визначення складу результатів експерименту.

У межах експерименту заздалегідь визначається уніфікований склад вихідних артефактів, що забезпечує порівнянність між етапами та відтворюваність результатів. До нього відносяться:

- підсумкові метрики якості класифікації для ДСРБ та базових моделей (зокрема, за критеріями – Каппа, MCC, $F1_{neg}$), а також показник ризику гіподіагностики негативного класу Specificity та композитна метрика якості KQ ;
- матриці помилок (TN/FP/FN/TP) та похідні показники;
- метадані запуску (параметри генерації даних і тренування, початкові значення генератору, версії, ідентифікатор серії);
- агреговані табличні представлення результатів серії прогонів (run-level і summary-level) для статистичної валідації, включно з метриками різниці показників якості для пари моделей (ДСРБ – Random Forest).

За потреби до складу результатів включаються візуалізації (графіки розподілів синтетичних ознак, діаграми стабільності/варіативності метрик), що інтерпретують властивості згенерованих даних і поведінку алгоритму.

Етап 5. Проведення експерименту.

Експеримент виконується як відтворюваний конвеєр запусків, у якому фіксуються конфігурації (YAML), seed-значення та версії артефактів, після чого послідовно запускаються процедури генерації наборів даних і навчання ДСРБ (переважно через *.bat-скрипти як основний механізм запуску). У процесі забезпечується журналювання (log files), контроль успішності за вихідним кодом та наявністю вихідних артефактів (результати, метадані, матриці помилок), а також повторюваність запусків шляхом централізованого збереження даних і результатів у стандартизованій структурі директорій. За потреби підтримується пакетний режим виконання (серії прогонів/запусків) із подальшим автоматизованим парсингом та агрегацією результатів.

Етап 6. Аналіз результатів експерименту.

Аналіз результатів експерименту здійснюється як послідовний процес інтерпретації якості та стійкості ДСРБ в контрольних і стресових умовах: виконується узагальнення метрик (зокрема Каппа, MCC, $F1_{neg}$, Specificity, KQ) і матриць помилок із застосуванням базових характеристик описової статистики (середні значення, медіани та

стандартні відхилення), оцінюється варіативність результатів між запусками/початковим значенням генератору та зіставляються конфігурації «до/після» увімкнення ключових механізмів (KQ , імовірнісне голосування, калібрування, робастне масштабування) через зміну інтегральних показників. Додатково аналізується неоднорідність отриманих ефектів між наборами даних/умовами генерації та чутливість результатів до параметрів моделі даних (кореляційні та регресійні зіставлення). Окремо виконується формалізоване парне зіставлення ДСРБ з базовими класифікаторами з аналізом метрик різниці значень їх властивостей та статистичним підтвердженням значущості й практичної прийнятності величини ефекту.

Для статистичного аналізу достовірності різниці результатів моделей використовуються:

- t -критерій, в тому числі в варіанті [18], зі статистикою, скоригованою для випадку залежних підвибірок;
- критерій Вілксона (пріоритетний для асиметричних розподілів та при наявності «хвостів»);
- пермутаційний тест [19], оснований на випадкових перестановках результатів між двома моделями, в його

односторонньому варіанті (гіпотеза: $M1$ краща за $M2$).

Опис проведених експериментів та аналіз отриманих результатів. З метою валідації алгоритму ДСРБ та дослідження його властивостей було виконано три обчислювальні експерименти.

Кожен із них був підпорядкованим певній цілі дослідження, включав генерацію та формування необхідного й достатньо репрезентативного набору даних, а також використовував підмножину функцій алгоритму СОЕ, відповідну поставленій цілі.

Експеримент 1 мав на меті базову валідацію алгоритму ДСРБ на контрольній синтетичній моделі з нормальним розподілом.

Задачею експерименту було встановлення опорної «контрольної» оцінки якості прогнозування значення індикатору ДСРБ за умови високої роздільності класів, де очікується близька до ідеальної якість (див. рис. 1). Синтетичний набір даних був сформованим із структурою (2) на основі нормального батьківського розподілу з обрізанням у нулі (гарантування невід'ємності ознак). Для відбору значень ресурсних ознак був використаний пороговий підхід (3). Імітована структура періоду спостережень (див. підрозд. 4.1) включала 100 підперіодів із 30 елементами в кожному. Баланс класів, заданий значеннями мітки, становив 0.3 стосовно негативного класу. Лагові ознаки були сформовані на періодному рівні як детерміновані функції згенерованої послідовності 100 значень мітки L . При цьому для підперіоду з номером j $FNT(j) = L(j - 1)$, а $FH(j)$ відображає довжину поточної стабільної послідовності станів. Далі L , FNT і FH розгортаються в 30 спостережень реплікацією в межах періоду. Об'єм батьківських вибірок масштабується коефіцієнтом 10, що забезпечує резерв значень для фільтрації та стабільність генерації.

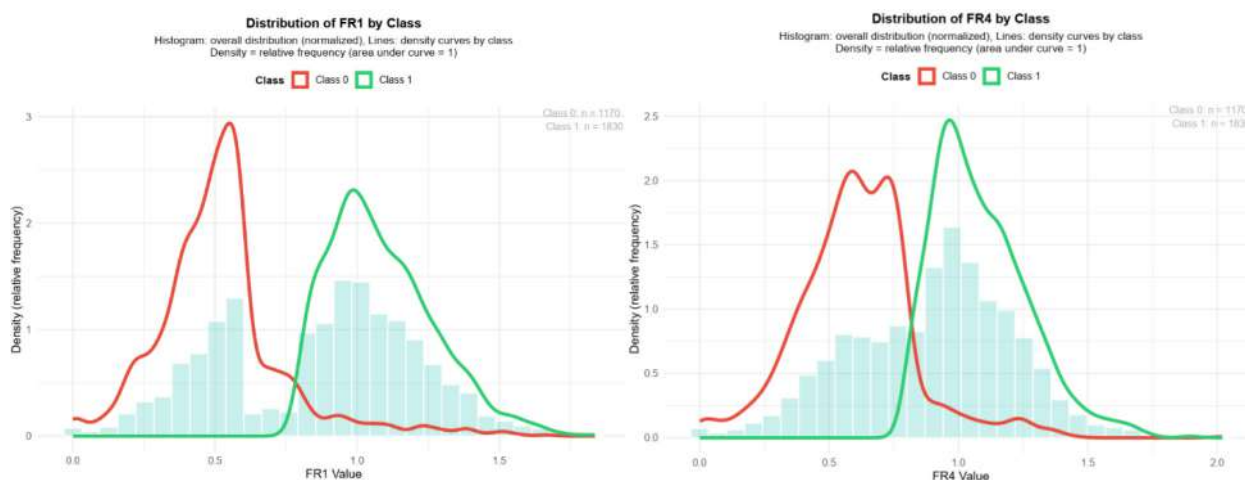


Рис. 1. Ілюстрація розподілів для ресурсних ознак в Експерименті 1

В якості сукупності механізмів, використаних в алгоритмі ДСРБ, був репрезентований мінімальний набір: каппа Коена як критерій якості класифікації; інтеграція результатів методом зваженого бінарного голосування з ваговими коефіцієнтами, що враховують критерій якості та рівень апріорної довіри до кожної моделі [1].

Верифікація алгоритму в 10 імітаційних повтореннях надала середні результати

$$Kapra = 0.9803; \quad Spec = 1.$$

Це дозволяє судити про успішність верифікації в аспекті коректної реалізації алгоритму. Але водночас такі результати вказують, що використані дані є «надто легкими» для алгоритму ДСРБ, що не дозволяє повноцінно дослідити внесок його спеціальних механізмів.

Таким чином, проведення подальших досліджень вимагало перегляду вхідного набору даних.

Експеримент 2 здійснювався з метою дослідження внеску окремих механізмів алгоритму ДСРБ до показників якості прогнозу класифікації.

Задачею дослідження було виявлення змін у показниках якості, що виникають при еволюції алгоритму ДСРБ, здійснюваній поетапним введенням додаткових механізмів, що належать до обґрунтованих у Таблиці 1 та врахованих у складі Етапу 3 алгоритму СОЕ.

Таким чином етапність Експерименту 2 передбачає наступне.

Етап 1. Додавання композитного критерію якості KQ [1] із налаштуванням використання KQ для оптимізації гіперпараметрів базових моделей.

Етап 2. Додавання механізму ймовірнісного голосування з оптимізацією порогу дискретизації для 4 моделей із збереженням дискретного для SVM.

Етап 3. Додавання до ймовірнісного голосування SVM із псевдо-ймовірностями.

Етап 4. Додавання крос-валідаційного уніфікованого калібрування всіх моделей за методом Платта.

На основі досвіду Експерименту 1 було сформовано більш реалістичні умови для індикатору ДСРБ – в аспектах дисбалансу класів, перекриття розподілів ознак, підвищеної варіативності (див. рис. 2). Набір даних генерується за тією самою структурною схемою і пороговим механізмом формування сигнальних ознак, лагові ознаки обчислюються аналогічно Етапу 1 як похідні від періодних міток L (без додаткового шуму міток), забезпечуючи часовий контекст для моделей за збереження незалежної генерації L по періодах. Обрана параметризація навмисно ускладнює задачу класифікації шляхом посилення класового дисбалансу (до 0.1 за негативним класом), збільшення варіативності батьківського розподілу ознак та зсуву порогів (предикати F , F_1 з (3)) у напрямку системного перекриття класів. У такий спосіб реалізується кероване «зашумлення» даних як стрес-модель для перевірки стійкості алгоритму ДСРБ та оцінювання ефекту запропонованих алгоритмічних покращень.

За використання базової версії алгоритму ДСРБ, ідентичної застосованій в Експерименті 1, для сформованих наборів даних було отримано такі значення метрик: $Kappa = 0.8112$; $Spec = 0.7232$.

Отже, подальші експерименти виконувалися в умовах зниженої інформативності вибірок порівняно з Експериментом 1.

Результати поетапної еволюції алгоритму наведено у вигляді значень метрик (KQ , $Spec$):

- Етап 1: (0.8452; 0.7321);
- Етап 2: (0.8970; 0.8482);
- Етап 3: (0.8820; 0.8661);
- Етап 4: (0.9071; 0.8661).

Загалом спостерігається узгоджене зростання обох метрик у процесі еволюції алгоритму. Тимчасове зниження значення KQ на Етапі 3 може бути пов'язане з проміжною фазою інтеграції моделі SVM, що передусе досягненню стабільного балансу між узагальнюючою здатністю класифікатора та його специфічністю. Отримані результати свідчать про доцільність прийнятих при розробці алгоритму ДСРБ рішень щодо подолання базових викликів предметної області використання індикатора.

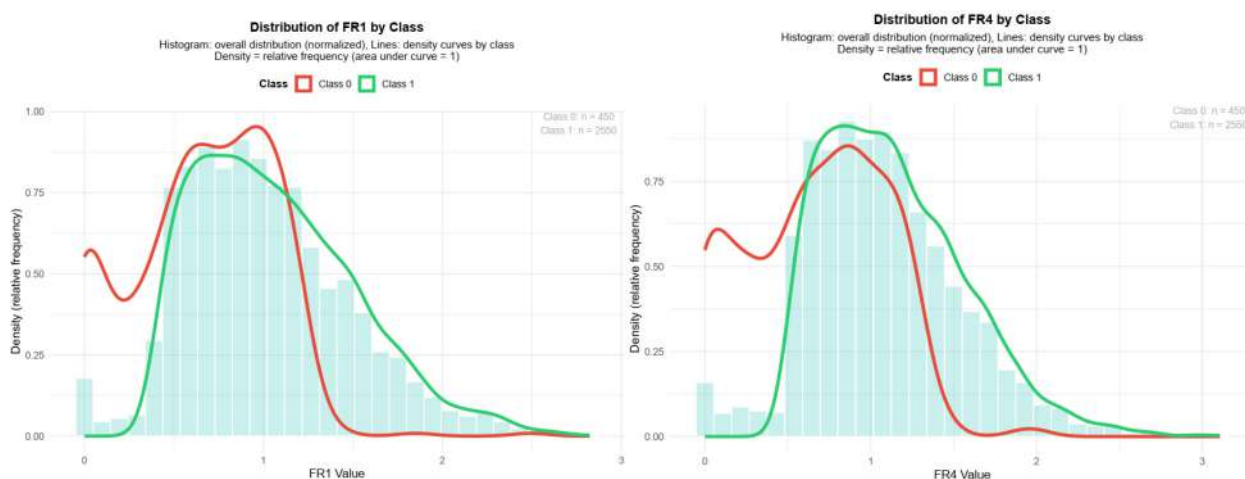


Рис. 2. Ілюстрація розподілів для ресурсних ознак Експерименту 2

Експеримент 3 було проведено з метою дослідження властивостей алгоритму ДСРБ в умовах значного впливу викликів, окреслених у постановці проблеми.

Основними завданнями експерименту були:

- генерація та наповнення відповідних наборів даних;
- навчання моделі та виконання прогнозування на заздалегідь виділених підмножинах наборів даних із використанням найбільш розвиненої версії алгоритму ДСРБ, що відповідає конфігурації Етапу 4 Експерименту 2;
- аналіз якості та стійкості результатів роботи алгоритму, зокрема в аспекті порівняння ефективності ансамблю з його найбільш успішним окремим елементом.

Для імітації ресурсної картини, характерної для систем, що розглядаються [3], було сформовано набір даних із чотирма сигнальними ресурсними ознаками FR_1 – FR_4 , кожна з яких має логнормальний розподіл, де параметри розподілу задано таким чином:

$$\begin{aligned}(\mu_{ln}^{(1)}, \sigma_{ln}^{(1)}) &= (-0.4476, 0.67), & (\mu_{ln}^{(2)}, \sigma_{ln}^{(2)}) &= (-0.7090, 0.84), \\ (\mu_{ln}^{(3)}, \sigma_{ln}^{(3)}) &= (-0.5760, 0.76), & (\mu_{ln}^{(4)}, \sigma_{ln}^{(4)}) &= (-0.2110, 0.46).\end{aligned}$$

Інші 6 ресурсних ознак відіграють шумову роль та генеруються з довільними параметрами.

З метою ускладнення поверхні розділу між класами, посилення акценту на правому «хвості» розподілу та збільшення скупченості значень поблизу 1 було застосовано м'який відбір із батьківських вибірок (див. п. Б етапу 2) із параметрами $\alpha = 1$, $\beta = 0.9$, $\delta = 1.2$, $k = 4$, $\lambda = 1.5$ (див. (3)).

Частка негативного класу в наборі даних становила 0.2, при цьому зашумлення міток здійснювалося з імовірністю 0.03.

Поведінку сформованих розподілів ознак проілюстровано на рис. 3.

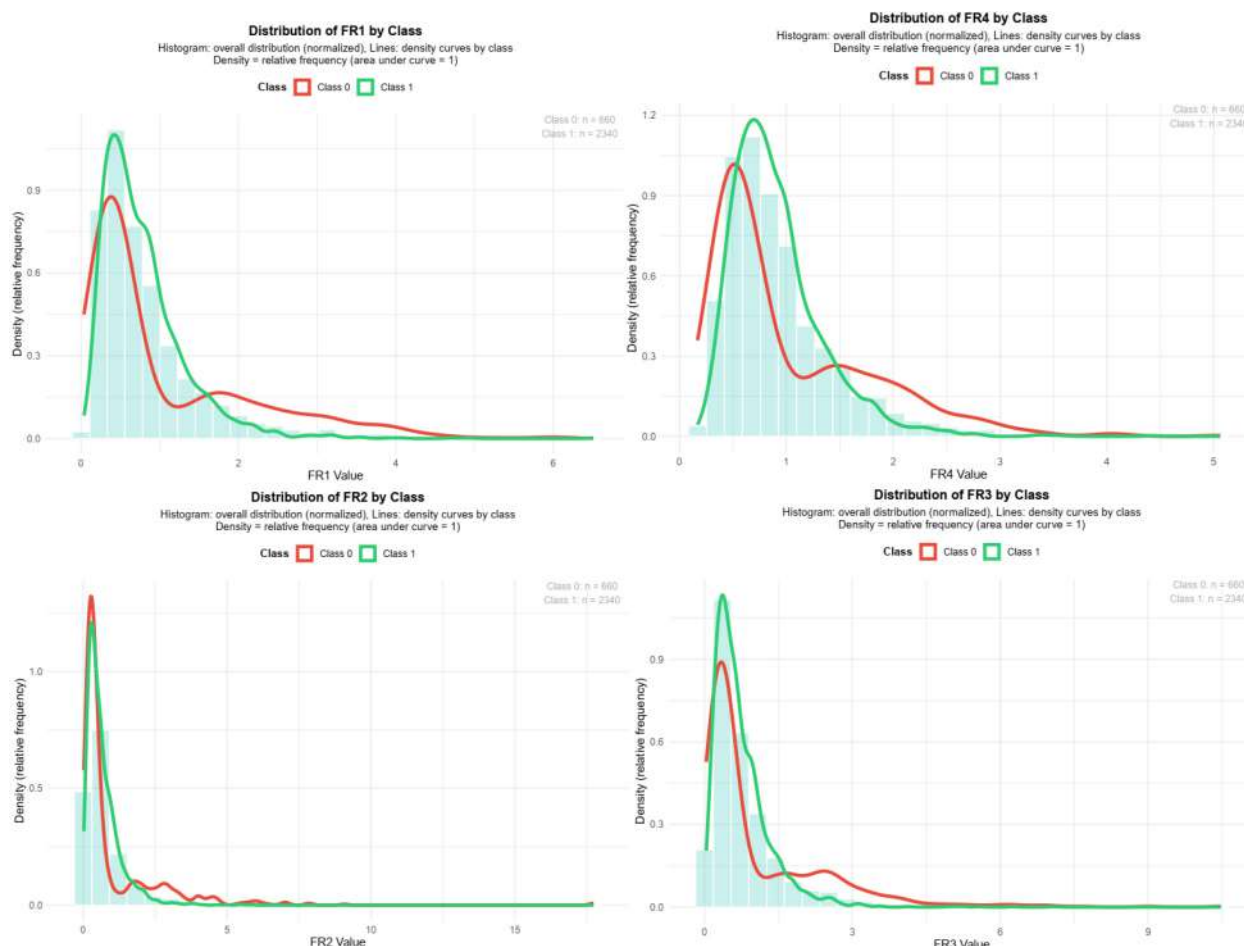


Рис. 3. Ілюстрація розподілів для чотирьох сигнальних ресурсних ознак Експерименту 3

Було згенеровано 5 наборів даних, для яких відрізнявся об'єм вибірок (кількість спостережень): 3000, 1500, 840, 364, 140. На кожному наборі даних було виконано 50 прогонів.

У табл. 2 наведено узагальнену оцінку переваги ансамблю ДСРБ над Random Forest для всіх 250 прогонів у парному дизайні (для кожного прогону обидві моделі оцінюються на тих самих даних). Таблиця одночасно

містить описову статистику різниць $\Delta = (RSI - RF)$ та результати статистичних тестів достовірності переваги (одностороння гіпотеза: алгоритм ДРСБ кращий за RF). Звертає увагу на себе перевага композитного індикатору порівняно з кращим компонентом – RF, яка має місце за всіма метриками якості.

Водночас середні значення KQ для обох індикаторів лежать у зоні розмитих рішень (ДРСБ: 0.6260; RF: 0.5578). Однак при сильному дисбалансі класів інтервал 0.6–0.7 для комбінованої метрики якості вважається прийнятним [20], [21].

Таблиця 2

Перевага ансамблю ДРСБ над RF у парному дизайні: описова статистика різниць та статистична значущість

Показник ($n = 250$, $\Delta = \text{ДРСБ} - \text{RF}$)	ΔKQ	$\Delta F1_{neg}$	$\Delta Spec$
Середнє значення Δ	0.0682	0.0823	0.2462
Медіана Δ	0.0499	0.0647	0.2143
Стандартне відхилення Δ	0.0683	0.0726	0.1559
Мінімум Δ	-0.0533	-0.0441	-0.0909
Максимум Δ	0.3715	0.3857	0.6818
Критерій Вілкоксона: p-value ($H1: \Delta > 0$)	2.06×10^{-38} (<0.001)	3.40×10^{-41} (<0.001)	1.28×10^{-41} (<0.001)
Критерій Вілкоксона: 95 % ДІ	[0.0528, ∞]	[0.0653, ∞]	[0.2222, ∞]
Парний t-критерій: p-value ($H1: \Delta > 0$)	1.20×10^{-39} (<0.001)	4.63×10^{-47} (<0.001)	4.49×10^{-70} (<0.001)
Парний t-критерій: 95 % ДІ	[0.0610, ∞]	[0.0610, ∞]	[0.0610, ∞]
Розмір ефекту (d Коена)	1.4112	1.6046	2.2341

Висновки

Використання додаткових механізмів адаптивної гармонізації та інтеграції (калібрування моделей, композитна метрика якості, зважене ймовірнісне голосування з оптимізацією порогів дискретизації) надає вагомий внесок до збільшення ефективності моделі гетерогенного ансамблю класифікаторів для індикатору ДРСБ. Відповідні ефекти підтверджені в обчислювальних експериментах на основі динаміки зростання досягненої якості класифікації за трикомпонентним критерієм при покроковому еволюціонуванні алгоритму.

Досліджена ансамблева модель демонструє приблизно однаковий рівень якості з її кращим (і вже також ансамблевим за своєю структурою) компонентом-моделлю Random forest на статистичних даних помірної складності, коли комбінований показник якості класифікації $KQ > 0.8$ (область впевненого прийняття рішень).

При використанні в ситуаціях, складних для класифікації (високий дисбаланс класів, складна границя розділення класів, нелінійний вплив передісторії, асиметричний розподіл із важким «хвостом» та концентрацією біля точки $x = 1$), при значенні $0.6 < KQ < 0.7$ (прийнятна якість класифікації) ансамблева модель достовірно переважає Random forest як за значенням KQ , так і за показником специфічності (ризик гіподіагностики ресурсної небезпеки).

Це робить модель індикатору перспективною для знаходження зон підвищеної уваги та для порівняння стратегічної благополучності різних часових періодів.

Розроблений інструментарій підтримки обчислювальних експериментів надає засоби для проведення подальших досліджень для докладного визначення зон пріоритетності ансамблевої моделі індикатору ДРСБ.

Список використаної літератури

1. Skybyk S., Doroshenko A., Ilyina O., Sinitsyn I. Machine-learning-based model for indicators of the resource-based security of interests in high-level organizational systems. In: V. Snytyuk, V. Pleskach, I. Javorskyj, M. Dyvak, N. Goranin, V. Levashenko, E. Zaitseva, & O. Pursky (Eds.). *Proc. 9th International Scientific and Practical Conference "Applied Information Systems and Technologies in the Digital Society" (AISTDS 2025)* (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 4133, pp. 153–169). 2025. CEUR-WS.
2. Ільїна О., Сініцин І., Слабоспицька О. Принципи та моделі експертно-аналітичної методології підтримки формування адаптивних організаційних рішень за умов глибокої невизначеності. *Проблеми програмування*. 2022. № 3–4. С. 364–375. DOI: <https://doi.org/10.15407/pp2022.03-04.364>
3. Сініцин І. П., Шевченко В. Л., Дорошенко А. Ю., Федоренко Р. М. *Моделі та програмні системи управління оборонними ресурсами: монографія*. Київ : ІПС НАНУ, 2024.
4. Dietterich T. G. Ensemble methods in machine learning. *Multiple Classifier Systems. MCS 2000. Lecture Notes in Computer Science*. 2000. Vol. 1857. P. 1–15. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-45014-9_1
5. Kuncheva L. I. *Combining pattern classifiers: methods and algorithms*. New York : Wiley-Interscience, 2004.
6. Polikar R. Ensemble based systems in decision making. *IEEE Circuits and Systems Magazine*. 2006. Vol. 6, N 3. P. 21–45. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCAS.2006.1688199>

7. Hnatchuk Y., Lebedovska M. Decision support system for project resource planning based on the random forest method. *Computer Systems and Information Technologies*. 2025. Vol. 4. P. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.31891/csit-2025-4-4>
8. Sommer R., Paxson V. Outside the closed world: on using machine learning for network intrusion detection. *Proc. of the 2010 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP'10)*. Washington : IEEE, 2010. P. 305–316. DOI: <https://doi.org/10.1109/SP.2010.25>
9. Fawcett T., Provost F. Combining data mining and machine learning for effective user profiling. *Proc. 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'96)*. 1996. P. 8–13.
10. Fawcett T. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*. 2006. Vol. 27, N. 8. P. 861–874. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>
11. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The elements of statistical learning*. New York : Springer, 2009.
12. Gentleman R., Lang D. T. Statistical analyses and reproducible research. *Journal of Computational and Graphical Statistics*. 2007. Vol. 16, N 1. P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.1198/106186007X178663>
13. Santner T. J., Williams B. J., Notz W. I. *The design and analysis of computer experiments*. New York : Springer, 2018.
14. Kress M. *Operational logistics: the art and science of sustaining military operations*. 2nd ed. New York : Springer International Publishing, 2016.
15. Степанюк М. Ю., Сініцин І. П., Котеля О. В. Проблема створення інформаційної системи логістики в Збройних силах України, що відповідає стандартам НАТО. *Проблеми програмування*. 2018. № 4. С. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.15407/pp2018.04.101>
16. Large J., Lines J., Bagnall A. A probabilistic classifier ensemble weighting scheme based on exponentially weighting the probability estimates. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2019. Vol. 33. P. 1674–1709. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10618-019-00638-y>
17. Sokolova M., Lapalme G. A systematic analysis of performance measures for classification tasks. *Information Processing & Management*. 2009. Vol. 45, N 4. P. 427–437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2009.03.002>
18. Nadeau C., Bengio Y. Inference for the generalization error. *Machine Learning*. 2003. Vol. 52, N 3. P. 239–281. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1024068626366>
19. Ojala M., Garriga G. C. Permutation tests for studying classifier performance. *Journal of Machine Learning Research*. 2010. Vol. 11. P. 1833–1863. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDM.2009.108>
20. Baldi P., Brunak S., Chauvin Y., Andersen C. A. F., Nielsen H. Assessing the accuracy of prediction algorithms for classification: an overview. *Bioinformatics*. 2000. Vol. 16, N 5. P. 412–424. DOI: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/16.5.412>
21. Witten I. H., Frank E., Hall M. A., Pal C. J. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. 4th ed. Burlington : Morgan Kaufmann, 2016.

References

1. Skybyk, S., Doroshenko, A., Ilyina, O., & Sinitsyn, I. (2025). Machine-learning-based model for indicators of the resource-based security of interests in high-level organizational systems. In: V. Snytyuk, V. Pleskach, I. Javorskyj, M. Dyvak, N. Goranin, V. Levashenko, E. Zaitseva, & O. Pursky (Eds.). *Proc. 9th International Scientific and Practical Conference "Applied Information Systems and Technologies in the Digital Society" (AISTDS 2025) (CEUR Workshop Proceedings)*, 4133, 153–169. CEUR-WS.
2. Illina, O. P., Sinitsyn, I. P., & Slabospitska, O. O. (2022). Principles and models of expert-analytical methodology for adaptive organizational decisions forming under deep uncertainty. *Problems in programming*, (3–4) 364–375. <https://doi.org/10.15407/pp2022.03-04.364> [in Ukrainian].
3. Sinitsyn, I. P., Shevchenko, V. L., Doroshenko, A. Yu., & Fedorenko, R. M. (2024). *Models and software systems for defense resource management: monograph*. Institute of Software Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine. [in Ukrainian].
4. Dietterich, T. G. (2000). Ensemble methods in machine learning. *Multiple Classifier Systems. MCS 2000. Lecture Notes in Computer Science*, 1857, 1–15. https://doi.org/10.1007/3-540-45014-9_1
5. Kuncheva, L. I. (2004). *Combining pattern classifiers: methods and algorithms*. Wiley-Interscience.
6. Polikar, R. (2006). Ensemble based systems in decision making. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 6(3) 21–45. <https://doi.org/10.1109/MCAS.2006.1688199>
7. Hnatchuk, Y., & Lebedovska, M. (2025). Decision support system for project resource planning based on the random forest method. *Computer Systems and Information Technologies*, 4, 35–42. <https://doi.org/10.31891/csit-2025-4-4>
8. Sommer, R., & Paxson, V. (2010). Outside the closed world: on using machine learning for network intrusion detection. *Proceedings of the 2010 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP'10)*, 305–316. <https://doi.org/10.1109/SP.2010.25>

9. Fawcett, T., & Provost, F. (1996). Combining data mining and machine learning for effective user profiling. *Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '96)*, 8–13.
10. Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861–874. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>
11. Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning*. Springer.
12. Gentleman, R., & Lang, D. T. (2007). Statistical analyses and reproducible research. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 16(1), 1–23. <https://doi.org/10.1198/106186007X178663>
13. Santner, T. J., Williams, B. J., & Notz, W. I. (2018). *The design and analysis of computer experiments*. Springer.
14. Kress, M. (2016). *Operational logistics: the art and science of sustaining military operations*. 2nd ed. Springer International Publishing.
15. Stepaniuk, M. Y., Sinitsyn, I. P., & Kotelia, O. V. (2018). About applicability of NATO logistics information systems in Ukraine. *Problems in programming*, 4, 101–110. <https://doi.org/10.15407/pp2018.04.101> [in Ukrainian].
16. Large, J., Lines, J., & Bagnall, A. (2019). A probabilistic classifier ensemble weighting scheme based on exponentially weighting the probability estimates. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 33, 1674–1709. <https://doi.org/10.1007/s10618-019-00638-y>
17. Sokolova, M., & Lapalme, G. (2009). A systematic analysis of performance measures for classification tasks. *Information Processing & Management*, 45(4), 427–437. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2009.03.002>
18. Nadeau, C., & Bengio, Y. (2003). Inference for the generalization error. *Machine Learning* 52(3), 239–281. <https://doi.org/10.1023/A:1024068626366>
19. Ojala, M., & Garriga, G. C. (2010). Permutation tests for studying classifier performance. *Journal of Machine Learning Research*, 11, 1833–1863. <https://doi.org/10.1109/ICDM.2009.108>
20. Baldi, P., Brunak, S., Chauvin, Y., Andersen, C. A. F., & Nielsen, H. (2000). Assessing the accuracy of prediction algorithms for classification: an overview. *Bioinformatics*, 16(5), 412–424. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/16.5.412>
21. Witten, I. H., Frank, E., Hall, M. A., & Pal, C. J. (2016). *Data mining: practical machine learning tools and techniques*. 4th ed. Morgan Kaufmann.

Дата першого надходження статті до видання: 08.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

М. О. СЛАБІНОГА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0002-7296-0356

П. С. ОСТАША

аспірант кафедри комп'ютерних систем і мереж
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0009-0005-8756-3520

РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОГО МОДУЛЯ ЦИФРОВОГО СУПРОВОДУ ДІЯЛЬНОСТІ КОЛЕГІАЛЬНИХ ОРГАНІВ У ЄДИНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ УНІВЕРСИТЕТУ

У статті автори досліджують проблему цифровізації управлінських процесів у вищій школі. Традиційні методи фіксації результатів засідань вчених та методичних рад на паперових носіях супроводжуються значними часовими витратами на підрахунок голосів та ручне оформлення документації. Відсутність інтеграції цих процесів із централізованою базою даних університету призводить до фрагментації інформації та затримок у виконанні рішень. Метою дослідження є розробка архітектури та програмна реалізація модуля для цифрового супроводу голосування, що забезпечує прозорість та оперативність управління в межах єдиної системи закладу.

Практична реалізація модуля здійснена в системі ІФНТУНГ «Alma mater» на базі PHP та MySQL. Архітектура системи використовує MVC-подібний підхід із чітким розділенням контролерів, моделей та сервісів, що гарантує її масштабованість. Для спрощення доступу користувачів під час засідань впроваджено OTP-автентифікацію (шестизначні одноразові паролі) та захист Captcha, що усуває потребу складного входу через корпоративні акаунти. Проєктування бази даних спиралося на розроблену ER-діаграму, яка охоплює сутності для обліку рад, засідань, пропозицій та персональних голосів учасників.

Визначена рольова модель (голова, секретар, член ради) дозволяє повністю автоматизувати цикл роботи: від формування порядку денного до миттєвої генерації журналів голосування та підсумкових протоколів. Система підтримує варіанти «за», «проти» та «утримався», забезпечуючи поіменну фіксацію волевиявлення в реальному часі. Узагальнені результати свідчать, що впровадження модуля ліквідує ризики технічних помилок, підвищує виконавську дисципліну та забезпечує аудит прийнятих рішень. Перспективним напрямом розвитку визначено інтеграцію технології blockchain для забезпечення таємного неспростовуваного голосування.

Ключові слова: цифровізація, інформаційна система університету, колегіальні органи, електронне голосування, автоматизація управління, архітектура ПЗ, PHP, MySQL, OTP-автентифікація, протоколювання результатів, ER-діаграма.

М. О. SLABINOHA

PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Computer Systems and Networks
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0002-7296-0356

P. S. OSTASHA

Postgraduate Student at the Department of Computer Systems and Networks
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0009-0005-8756-3520

DEVELOPMENT OF A FUNCTIONAL MODULE FOR DIGITAL SUPPORT OF THE ACTIVITIES OF COLLEGAL BODIES IN THE UNIFIED INFORMATION SYSTEM OF THE UNIVERSITY

In the article authors investigate the problem of digitalization of management processes in higher education. Traditional methods of recording the results of meetings of academic and methodological councils on paper media are accompanied by significant time costs for counting votes and manual documentation. The lack of integration of these processes with the centralized database of the university leads to fragmentation of information and delays in the implementation



© М. О. Слабінога, П. С. Осташа, 2026

Стаття поширюється на умовах відкритої ліцензії CC BY 4.0

of decisions. The purpose of the study is to develop an architecture and software implementation of a module for digital support of voting, which ensures transparency and efficiency of management within the unified system of the institution.

The practical implementation of the module was carried out in the IFNTUNG "Alma mater" system based on PHP and MySQL. The system architecture uses an MVC-like approach with a clear separation of controllers, models and services, which guarantees its scalability. To simplify user access during meetings, OTP authentication (six-digit one-time passwords) and Captcha protection were implemented, which eliminates the need for complex login through corporate accounts. The database design was based on the developed ER diagram, which includes entities for accounting for councils, meetings, proposals and personal votes of participants.

The defined role model (chairman, secretary, council member) allows for the complete automation of the work cycle: from the formation of the agenda to the instant generation of voting logs and final protocols. The system supports the options "for", "against" and "abstain", providing real-time registration of the expression of will by name. The generalized results indicate that the implementation of the module eliminates the risks of technical errors, increases executive discipline and provides an audit of decisions made. The integration of blockchain technology to ensure secret, irrefutable voting is identified as a promising direction of development.

Key words: digitalization, university information system, collegial bodies, electronic voting, management automation, software architecture, PHP, MySQL, OTP authentication, results logging, ER diagram.

Постановка проблеми

Проблематика документування та обліку результатів голосувань у межах діяльності колегіальних органів сучасного університету зумовлена необхідністю забезпечення високого рівня прозорості, юридичної достовірності та оперативності прийняття управлінських рішень. Традиційні методи фіксації волевиявлення на засіданнях вчених та методичних рад, які часто базуються на паперових носіях або розрізнених електронних таблицях, супроводжуються суттєвими часовими витратами на підрахунок голосів, верифікацію кворуму та ручне оформлення протоколів. Такий підхід створює ризики виникнення технічних помилок, ускладнює процес аудиту прийнятих рішень та не відповідає сучасним вимогам щодо цифровізації освітнього процесу, особливо в умовах дистанційної або гібридної форми роботи.

Окремий пласт проблем стосується відсутності наскрізної інтеграції процесів голосування з єдиною інформаційною системою закладу вищої освіти. За умов, коли результати поіменного голосування не фіксуються автоматично в централізованій базі даних, виникає явище фрагментації інформаційних потоків, що унеможливорює миттєве відображення змін у навчальних планах, кадровому складі чи наукових звітах, які затверджуються відповідними радами. Це призводить до дублювання функцій, коли секретарі рад змушені вручну вносити дані в різні підсистеми, знижуючи загальну ефективність управлінського менеджменту та створюючи часовий лаг між прийняттям рішення та його імплементацією в інформаційному середовищі університету.

Крім того, специфіка поіменного голосування вимагає суворого дотримання процедур ідентифікації учасників та неможливості зміни волевиявлення після завершення процедури, що вкрай складно забезпечити без спеціалізованого програмного модуля. У розрізі багаторівневої структури університету, де функціонують ради різного підпорядкування зі змінним складом учасників, ручне адміністрування прав доступу та архівація результатів голосувань стають критично ресурсомісткими задачами. Відсутність автоматизованого інструментарію для генерації витягів із протоколів та аналітики активності членів колегіальних органів знижує рівень виконавської дисципліни та ускладнює моніторинг якості роботи дорадчих структур університету.

Таким чином, розробка модуля цифрової підтримки голосування в колегіальних органах університету, інтегрованого в єдиний університетський простір, є актуальною науково-прикладною задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз наукового доробку у сфері цифровізації управлінських процесів свідчить про значний інтерес дослідників до проблематики електронного голосування (e-voting). Цифрова трансформація вищої освіти розглядається як стратегічний етап адаптації університетів до сучасних вимог, особливо в умовах війни в Україні, коли традиційні методи управління та навчання потребують негайної модернізації. Автор [1] пропонує концепцію «цифрового університету» як єдиного інформаційного середовища, де стратегії цифровізації – від використання готових рішень до власної розробки – залежать від масштабу закладу.

Впровадження систем електронного голосування стає обов'язковим кроком для підвищення ефективності діяльності студентських спілок, оскільки традиційні паперові методи вважаються занадто витратними та схильними до помилок. Автори [2] описують архітектуру веб-системи, яка охоплює всі стадії виборчого процесу: від реєстрації та верифікації виборців до автоматизованого підрахунку й оголошення результатів. Практичний досвід Університету Кабарак [3] демонструє, що такі системи значно підвищують явку виборців завдяки віддаленому доступу, забезпечують прозорість через аудит і суттєво зменшують витрати на друк бюлетенів та залучення персоналу.

Для успішного функціонування цифрових систем необхідно враховувати результати SWOT-аналізу, проведеного авторами [4], який виокремлює сильні сторони (анонімність, безпека) та загрози у вигляді кіберзагроз

і залежності від стабільності інтернет-зв'язку. Щодо реалізації, то альтернативою закритим платформам, проект OpenVoter [5] пропонує використовувати відкритий вихідний код, що дозволяє уникнути передачі персональних даних стороннім компаніям та забезпечує відповідність стандартам надійності транзакцій. Крім того, побудова таких систем повинна базуватися на засадах електронного документообігу та автоматизації, що розглядаються як фундамент для прийняття ефективних управлінських рішень у складній університетській екосистемі [6].

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка архітектури функціонального модуля голосування колективних органів університету з інтеграцією в існуючу інформаційну систему, що дозволить спростити процес обліку перебігу та результатів голосування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Єдина інформаційна система Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу «Alma mater» – це інструмент, інкрементна розробка якого розпочалася в 2024 році для забезпечення функціонування окремих управлінських процесів університету. Станом на кінець 2025 року, система містить модулі «Профіль викладача», «Індивідуальні плани роботи викладача», «Шаблони нормативної документації ІФНТУНГ» та «Система обліку відвідування басейну спорткомплексу ІФНТУНГ». Ведеться активна розробка нових модулів та підготовка системи до інтеграції з новим сайтом університету, який перебуває в розробці.

Серверна частина системи реалізована засобами PHP та MySQL, і поділена на окремі компоненти, а саме:

- файл `index.php` підключає конфігурації та слугує єдиною точкою входу в програмний інтерфейс (перенаправлення налаштоване за допомогою `.htaccess`);
- файл `dbconnect.php` створює екземпляр об'єкту `mysqli_connect` для підключення до бази даних;
- файл `config.php` завантажує основні змінні конфігурації;
- файл `router.php` слугує для виклику відповідних контролерів для отримання необхідних даних;
- каталог `controllers` містить контролери, які опрацьовують `https`-запит та повертають відповідь залежно від отриманих параметрів та адреси ендпоінта, до якого відбулося звернення;
- каталог `models` містить інформацію про структури даних та використовується для забезпечення цілісності цих структур, адже при додаванні нового елемента створюється відповідний екземпляр класу, і тільки потім здійснюється запит до бази даних;
- каталог `services` містить сервіси для кожної із сутностей, що відповідають за виконання операцій із базою даних;
- каталог `middleware` містить допоміжні функції, такі як перевірка авторизації, перевірка прав, тощо.

Інформаційна система, на момент розробки модуля, передбаченого завданням даного дослідження, містила таблицю користувачів з прив'язкою до корпоративної пошти Google Workspace, та автентифікацією з допомогою OAuth2, а також таблицю ролей, що використовувалася для визначення посад користувача у відповідних підрозділах. Однак, в процесі роботи користувачів з обліковими записами Google Workspace, часто виникають складнощі з автентифікацією. Задля спрощення процесу автентифікації та, при цьому, збереження її надійності, було вирішено використовувати одноразовий пароль із шести цифр, який надається кожному з членів ради перед засіданням. Таким чином, немає потреби автентифікуватися безпосередньо в системі, достатньо перейти на відповідну сторінку, ввести пароль, та приступити до голосування на відповідному засіданні.

В процесі проектування було виділено наступні ролі в системі інформаційної підтримки голосування:

- голова ради (має право додавати нових користувачів та видаляти існуючих користувачів із колегіального органу);
- секретар ради (може створювати нові плановані засідання, додавати питання на розгляд, тощо);
- член ради (може голосувати за питання, а також пропонувати нові питання на розгляд).

Для початкової роботи модуля був вибраний наступний сценарій роботи:

1. Голова ради попередньо додає до ради всіх учасників. Це робиться заздалегідь, перед засіданням, відповідно до наказів щодо затвердження складу ради, або включення чи виключення окремих її членів.

2. Секретар ради створює нове засідання, задає йому дату та майбутній номер протоколу. При створенні засідання, система генерує набір одноразових паролів для кожного з діючих членів ради, після чого розсилає їх на адреси електронної пошти. Оскільки на момент постановки завдання, задача таємного голосування не ставилася, паролі також генеруються для секретаря у вигляді списку в PDF документі для подальшого друку та роздачі безпосередньо на засіданні.

3. До початку засідання, користувачі інформаційної системи можуть вносити пропозиції щодо порядку денного, які відхиляє, або приймає секретар ради. При прийнятті, пропозиції потрапляють до порядку денного.

4. Секретар ради додає необхідні пункти, з інформацією та пропозицією, що виносяться на голосування.

5. В день голосування, члени ради входять на відповідну веб-сторінку системи та вводять одноразовий пароль (на сторінку встановлена Captcha для уникнення ризику підбору пароля). На веб-сторінці відображається список питань на порядку денному та винесені на них пропозиції. Кожен з учасників може проголосувати «за», «проти» або «утримався». Якщо вибір не було здійснено, вважається, що член ради за дане питання не голосував.

6. За результатами голосування, секретар вибирає для питання, що виносилося на голосування, статус «рішення прийнято» або «рішення не прийнято».

7. По завершенню всіх голосувань, секретар має можливість роздрукувати журнал голосування по кожному з питань, а також загальний протокол з питаннями, що виносилися, списком присутніх та результатом голосування.

Такий підхід дозволяє організувати поіменне голосування за питання, що не потребують таємного голосування, та де рішення учасника голосування може бути ідентифіковане відповідним чином.

ER-діаграма модуля голосування подана на рис. 1.

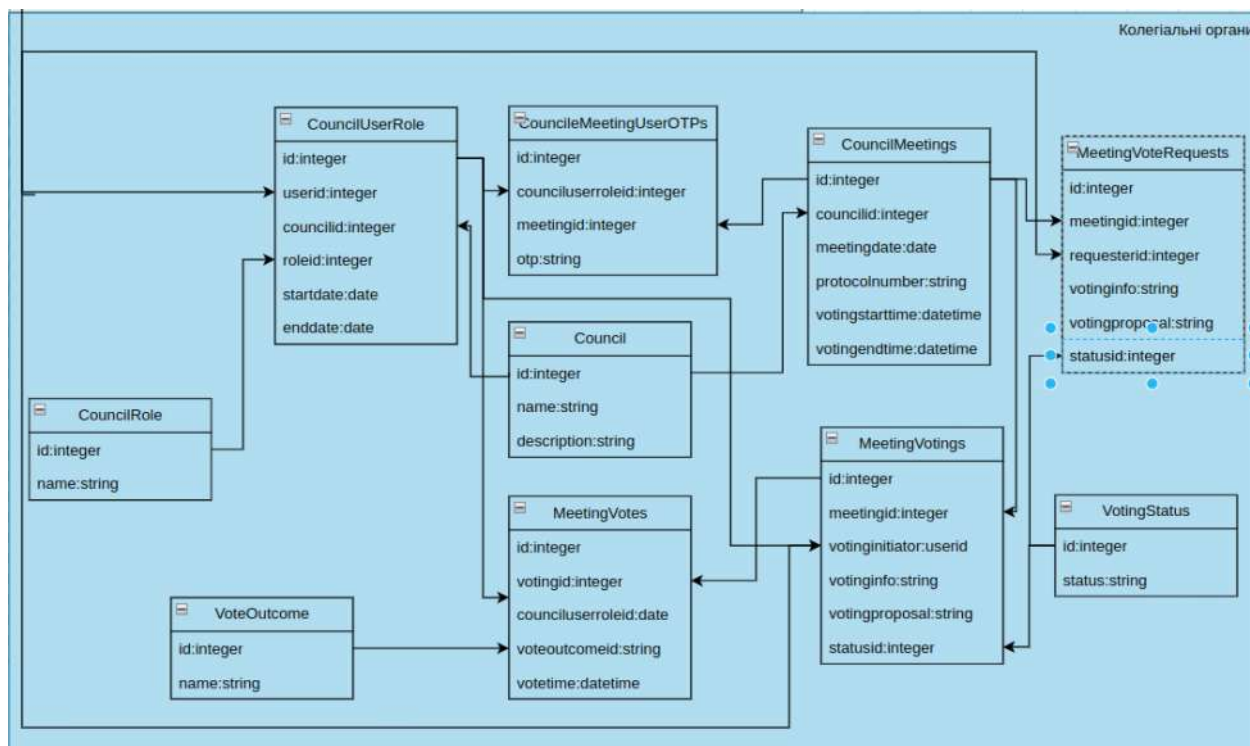


Рис. 1. ER-діаграма модуля голосування

Модуль конструктивно пов'язаний з полем id таблиці users (лівий верхній кут рисунка), та містить наступні сутності, виокремлені в базі даних у таблиці:

- Council – містить дані про колегіальний орган;
- CouncilUserRole – містить дані про членів колегіального органу, період їх участі в ньому, тощо;
- CouncilRole – містить перелік ролей в раді (голова, секретар, член ради);
- CouncilMeetings – містить дані про засідання ради;
- MeetingVoteRequests – містить пропозиції щодо винесення на чергове засідання колегіального органу (дані про особу, що вносить пропозицію, сама пропозиція та статус прийнято/відхилено, встановлений секретарем ради);
- MeetingVotings – містить дані про окремі питання, що виносяться на голосування;
- CouncilMeetingUserOTP – містить одноразові паролі для доступу конкретного користувача до голосування на засіданні;
- VotingStatus – містить перелік результатів голосування (прийнято, відхилено, знято з розгляду);
- MeetingVotes – містить дані про голос конкретного учасника голосування (дату, рішення, тощо);
- VoteOutcome – містить перелік можливих рішень учасників голосування (за, проти, утримався).

Запропонована структура дозволяє організувати серверну частину програмного забезпечення процесу голосування.

Висновки

У результаті проведеного дослідження розроблено архітектуру та реалізовано прототип функціонального модуля для цифрового супроводу засідань колегіальних органів у межах єдиної інформаційної системи ІФНТУНГ «Alma mater». Програмна реалізація виконана на базі стеку технологій PHP та MySQL із застосуванням MVC-подібної архітектури, що забезпечує чітке розмежування логіки обробки запитів (controllers), роботи з даними (models) та бізнес-логіки (services). Така структура дозволяє масштабувати систему та інтегрувати новостворений модуль із наявними компонентами, такими як профілі викладачів та нормативна база університету.

Ключовим елементом розробки стала оптимізація процесу взаємодії користувачів із системою шляхом впровадження механізму спрощеної автентифікації через одноразові шестизначні паролі (ОТР). Цей підхід вирішує проблему складності входу через корпоративні акаунти Google Workspace під час засідань, забезпечуючи при цьому достатній рівень безпеки завдяки використанню Captcha та прив'язці паролів до конкретних подій. Визначена рольова модель (голова, секретар, член ради) та сценарний підхід дозволили повністю автоматизувати цикл проведення відкритих голосувань: від формування порядку денного до фіксації результатів волевиявлення.

Спроектowana реляційна модель даних, яка включає сутності для опису рад, засідань, пропозицій та результатів голосування, забезпечує цілісність інформації та можливість поіменного обліку голосів. Реалізація даного модуля дозволяє відмовитися від ручного підрахунку голосів та паперової тяганини під час засідань методичних та вчених рад, надаючи інструментарій для миттєвої генерації протоколів та журналів голосування, що значно підвищує прозорість та оперативність прийняття управлінських рішень в університеті.

Подальшим розвитком даної системи є реалізація відповідного інтерфейсу користувача, формалізація процесу в нормативній документації університету. Перспективним напрямом є реалізація модифікації даного модуля для забезпечення таємного неспростовуваного голосування з використанням технології blockchain.

Список використаної літератури

1. Бобро Н. С. Формування цільової моделі цифрової трансформації університетів. *Розділ 2.2*. Київ : Європейський університет, 2024. DOI: 10.54929/monograph-12-2024-02-02.
2. ElSaid W. K. Building E-voting system for educational institutions. *International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT)*. 2018. Vol. 65, No. 1. P. 1–14.
3. Kabarak University Electronic Voting Information System (EVIS). *Kabarak University*. URL: <https://kabarak.ac.ke> (дата звернення: 24.05.2024).
4. Rashidov A. SWOT analysis of E-voting system in higher education institutions. *Technical University of Gabrovo*. 2023.
5. Rowe R. OpenVoter: An open source voting alternative. *GitHub*. 2020. URL: <https://github.com/robinrowe/OpenVoter>
6. Матвієнко О., Цивін М. Основи організації електронного документообігу : навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2008. 112 с.

References

1. Bobro, N. S. (2024). Formation of a target model of universities' digital transformation. In Monograph (Chapter 2.2). European University. <https://doi.org/10.54929/monograph-12-2024-02-02>
2. ElSaid, W. K. (2018). Building E-voting system for educational institutions. *International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT)*, 65(1), 1–14.
3. Kabarak University. (n.d.). Kabarak University Electronic Voting Information System (EVIS). Retrieved from <https://kabarak.ac.ke>
4. Rashidov, A. (2023). SWOT analysis of E-voting system in higher education institutions. *Technical University of Gabrovo*.
5. Rowe, R. (2020). OpenVoter: An open source voting alternative. *GitHub*. <https://github.com/robinrowe/OpenVoter>
6. Matviienko, O., & Tsyvin, M. (2008). Osnovy orhanizatsii elektronnoho dokumentoobihu [Basics of electronic document management organization]. Tsentr uchbovoi literatury.

Дата першого надходження статті до видання: 06.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

А. В. СОКОЛОВ

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри кібербезпеки
Національний університет «Одеська юридична академія»
ORCID: 0000-0003-0283-7229

В. М. СЛАТВІНСЬКА

доктор філософії, асистент кафедри кібербезпеки
Національний університет «Одеська юридична академія»
ORCID: 0000-0002-6082-981X

В. І. БЕВЗА

магістр I курсу
Національний університет «Одеська юридична академія»
ORCID: 0009-0007-2695-969X

ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ У ТРАФІКУ МОБІЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Кількість мобільних пристроїв у мережі швидко зростає. Разом із цим зростають обсяги передаваних даних. Через це кіберзахист мережевого трафіку ускладнюється. Сигнатурні методи дедалі частіше не спрацьовують. Нові атаки не мають стабільних ознак. Вони маскуються у легітимному трафіку. Тому для виявлення аномалій застосовують методи машинного навчання. Йдеться про автоматизовану обробку мережевого трафіку мобільних пристроїв.

Метою роботи є розробка та дослідження методів машинного навчання для виявлення аномальної поведінки у трафіку мобільних пристроїв, забезпечення раннього виявлення невідомих загроз та підвищення ефективності кіберзахисту.

Наукова новизна. Основа запропонованого підходу – алгоритми неконтрольованого навчання. Використано LSTM Autoencoder та Isolation Forest. Вони аналізують багатовимірні характеристики мобільного трафіку. Далі задається адаптивний поріг. Рівень хибних спрацювань зменшується. Надійність детекції зростає. Порівняння – з класичними статистичними методами.

Результати. Розроблено програмну систему виявлення аномалій на основі Python. У реалізації використано бібліотеки TensorFlow та scikit-learn. Алгоритми перевірено експериментально на реальних наборах мобільного трафіку. Найвищу точність виявлення аномалій показав LSTM Autoencoder – 96,1 %. Isolation Forest зберігає стабільну точність і високу швидкість обробки. Тому він придатний для систем з обмеженими ресурсами.

Висновки. Методи машинного навчання ефективні для інтелектуального аналізу мережевого трафіку мобільних пристроїв. LSTM Autoencoder забезпечує високоточну детекцію аномалій. Isolation Forest має меншу обчислювальну складність. Тому він придатний для реального часу. Результати підтверджують перспективність ML-підходів. Вони підтримують раннє виявлення невідомих кіберзагроз.

Ключові слова: машинне навчання, виявлення аномалій, мобільний трафік, нейронні мережі, python, кібербезпека, мережевий моніторинг.

A. V. SOKOLOV

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Cybersecurity
National University "Odesa Law Academy"
ORCID: 0000-0003-0283-7229

V. M. SLATVINSKA

Doctor of Philosophy,
Assistant Professor at the Department of Cybersecurity
National University "Odesa Law Academy"
ORCID: 0000-0002-6082-981X



V. I. BEVZA

1st year Master's Degree Student
National University "Odesa Law Academy"
ORCID: 0009-0007-2695-969X

DETECTION OF ANOMALIES IN MOBILE TRAFFIC USING MACHINE LEARNING

The number of mobile devices and data growth is giving a challenge to cybersecurity network traffic. Traditional signature-based approaches are losing their effectiveness as new types of attack have no consistent pattern and are also hidden in legitimate traffic. In this context, the application of machine learning techniques for the automated detection of anomalies in the mobile network traffic is of particular relevance.

The purpose of the paper is to develop and research machine learning methods for detecting anomalous behavior in mobile device traffic, enabling early identification of previously unknown threats, and enhancing the effectiveness of cyber defense.

Scientific novelty. An approach that relies on unsupervised learning algorithms LSTM Autoencoder and Isolation Forest is proposed for analyzing the multidimensional characteristics of mobile traffic. Using the adaptive threshold allows to decrease the false-positive rates and to increase detection reliability (compared to traditional statistical methods).

Results. A Python-based anomaly detection system was developed using the TensorFlow and scikit-learn libraries. The algorithms were experimentally evaluated on real mobile traffic datasets. The LSTM Autoencoder achieved the highest anomaly detection accuracy (96.1 %), while Isolation Forest offers a balance of stable accuracy and high processing speed, making it suitable for resource-constrained systems.

Conclusions. Machine learning methods are found to be fruitful in intelligent analysis of mobile network traffic. The use of LSTM Autoencoder allows finding very accurately, while algorithms like Isolation Forest have a lower computational complexity and can be applied in real-time. The results provide proof of concept of the potential of machine learning approaches for the early identification of previously unknown cyber threats.

Key words: machine learning, anomaly detection, mobile traffic, neural networks, Python, cybersecurity, network monitoring.

Постановка проблеми

Кількість мобільних пристроїв у мережі зростає. Це наслідок цифровізації сучасного суспільства. Зростання має експоненційний характер. Обсяги мережевого трафіку різко збільшуються. Поверхня атаки розширюється. Для зловмисників це додає можливостей. Традиційні засоби захисту не завжди адаптуються оперативно. Мережеве середовище змінюється динамічно. У мобільних мережах з'являються нові типи загроз. Серед них – розподілені атаки типу DDoS. Також фіксується діяльність ботнетів. Окремо йдеться про приховане шкідливе програмне забезпечення. На цьому тлі виявлення аномалій у мережевому трафіку стає ключовим завданням кібербезпеки. Відхилення від нормальної поведінки трафіку може означати компрометацію системи. Воно також може вказувати на цілеспрямовану атаку.

Актуальність дослідження – це практика сучасного кіберзахисту. Потрібне оперативне виявлення загроз у мережевому трафіку. Затримки критичні для функціонування інформаційних систем. Журнали подій вручну не масштабують. Особливо на високошвидкісних мережевих потоках. Фіксовані сигнатури і шаблонні правила швидко «стараються». Структура та характеристики трафіку постійно змінюються. Алгоритми машинного навчання беруть великі обсяги мережевих даних. Далі вони знаходять приховані патерни й нелінійні залежності. У явні правила це не згортається. Методи машинного навчання (ML) дають надійність і адаптивність систем кіберзахисту. Умови – динамічне та різноманітне мережеве середовище.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Виявлення аномалій у мережевому трафіку лишається актуальною задачею. Мережеві середовища ускладнюються. З'являються нові й раніше невідомі типи загроз. Тому дослідження тривають. Багато робіт спираються на неконтрольоване машинне навчання. Розмічені дані для цього не потрібні.

Зокрема, у роботі Neri M., Baldoni S. [1] запропоновано використання автоенкодерів із представленням мережевого трафіку у вигляді зображень, що дозволяє ефективно виявляти аномальні патерни без попереднього знання про типи атак. Питання підвищення довіри до результатів машинного навчання та їх інтерпретації розглядаються у дослідженні Singh K., Kashyap A., Cherukuri A. K. [2], де для пояснення рішень моделей у зашифрованому трафіку використовується метод SHAP.

Напрямок адаптивного аналізу мережевих потоків представлено в роботі Miguel-Diez A. та співавт. [3], у якій досліджується застосування неконтрольованого онлайн-навчання для динамічних мережевих середовищ. Для врахування часових залежностей у трафіку Noonari N. та співавт. [4] пропонують багатомасштабні згорткові LSTM-мережі з використанням трансферного навчання, орієнтовані на стільникові мережі.

Окрему групу робіт присвячено питанням ефективності та практичної реалізації систем виявлення аномалій. Так, Chen Z. та співавт. [5] аналізують можливості детектування аномалій в інфраструктурі машинного навчання на основі апаратної телеметрії, тоді як Benmachiche A., Rais K., Slimi H. [6] зосереджуються на методах машинного навчання реального часу для вбудованих систем. У контексті мереж наступних поколінь (6G) Rzym G., Masny A., Cholda P. [7] досліджують використання динамічної телеметрії та глибоких нейронних мереж у програмно-керованих мережах.

Комплексні підходи до проєктування та оцінки систем виявлення мережових аномалій на основі машинного навчання наведено у роботі Schummer P. та співавт. [8], а методи раннього виявлення загроз розглянуто у дослідженні Thwaini M. H. [9]. Узагальнюючий огляд сучасних методів машинного навчання для виявлення мережових аномалій представлено у роботі Mahmood N. та співавт. [10].

Є прогрес у застосуванні методів машинного навчання. Вимоги практичних систем при цьому не знімаються. Перша вимога – висока точність детектування. Друга – адаптивність до динамічних характеристик мобільного трафіку. Третій обмежувач – прийнятна обчислювальна складність. У системах реального часу ці параметри мають виконуватися одночасно.

Викладення основного матеріалу дослідження

Основним завданням даного дослідження є розробка моделі, здатної ідентифікувати аномальні патерни у потоках мережевого трафіку мобільних пристроїв в умовах відсутності повної інформації про типи можливих атак. З урахуванням гетерогенності мобільного трафіку та високої динаміки його характеристик у роботі застосовано підходи неконтрольованого машинного навчання, які не потребують розмічених наборів даних і є придатними для виявлення раніше невідомих загроз, що узгоджується з результатами, наведеними у [1, с. 2].

Для забезпечення практичної придатності запропонованої моделі окрему увагу приділено інтерпретованості результатів детектування, що є важливим чинником довіри до систем машинного навчання в задачах кіберзахисту, як зазначено в роботі [2, с. 3]. Аналіз трафіку здійснюється на рівні мережових потоків, що дозволяє узагальнювати поведінкові характеристики пристроїв і зменшувати чутливість до шуму, характерного для пакетного рівня, відповідно до підходів, описаних у [3, с. 4].

Для експериментальної перевірки ефективності запропонованого підходу було розроблено програмний модуль мовою Python. У роботі використано рекурентні нейронні мережі типу LSTM (Long Short-Term Memory), які демонструють високу ефективність при аналізі часових рядів мережевого трафіку та дозволяють враховувати часові залежності між послідовностями переданих даних, що підтверджується результатами досліджень [4, с. 2].

Крім того, під час реалізації моделей було враховано апаратні обмеження середовищ виконання, зокрема вимоги до швидкодії та обчислювальних ресурсів, що є критичним для систем реального часу. Відповідно до рекомендацій, наведених у [5, с. 3], програмну реалізацію оптимізовано з метою забезпечення прийнятної продуктивності без суттєвої втрати точності детектування.

У процесі дослідження було розроблено алгоритмічну схему автоматизованого виявлення аномалій у мережевому трафіку мобільних пристроїв на основі методу Isolation Forest для виявлення аномалій. Цей метод був обраний як базовий завдяки його швидкодії, що важливо для систем реального часу, як зазначають Benmachiche A., Rais K., Slimi H. [6, с. 2]. Запропонований підхід реалізує послідовний конвеєр обробки даних, що включає попередню підготовку трафіку, формування векторів ознак, навчання моделі та прийняття рішень щодо наявності аномальної поведінки. Загальна логіка функціонування системи представлена у вигляді блок-схеми (рис. 1).

Як видно з рис. 1, на першому етапі виконується збір та попередня обробка мережевого трафіку, що передбачає очищення даних і нормалізацію ознак з метою усунення масштабних відмінностей між параметрами. Далі формується багатовимірний вектор ознак, який використовується для навчання моделі неконтрольованого навчання Isolation Forest.

Моделі навчено – далі рахують оцінку аномальності. Розрахунок виконують для кожного мережевого з'єднання. Потім застосовують порогове значення. За ним трафік класифікують як нормальний або аномальний. Фінал – аналіз результатів. Ефективність алгоритму оцінюють за precision, recall та F1-мірою.

У контексті мереж майбутнього покоління (6G), як зазначають Rzym G., Masny A., Cholda P. [7, с. 384], важливим є використання динамічної телеметрії, що забезпечує безперервний моніторинг стану мережі в режимі реального часу. Зазначений підхід може бути інтегрований у запроповану у даній роботі систему виявлення аномалій на етапі збору та попередньої обробки мережових даних.

Schummer P., del Rio A., Serrano J., Jimenez D., Sánchez G., Llorente Á. [8, с. 2975] підкреслюють визначальну роль етапу оцінювання моделей машинного навчання, зокрема з використанням кількісних метрик ефективності. У межах даного дослідження оцінювання здійснюється на основі стандартних показників якості, що дозволяє об'єктивно порівняти результати роботи досліджуваних алгоритмів.

У табл. 1 наведено порівняльні характеристики ключових параметрів моделей машинного навчання. Таблиця узагальнює результати експериментального дослідження ефективності алгоритмів для задачі виявлення аномалій у мобільному мережевому трафіку.

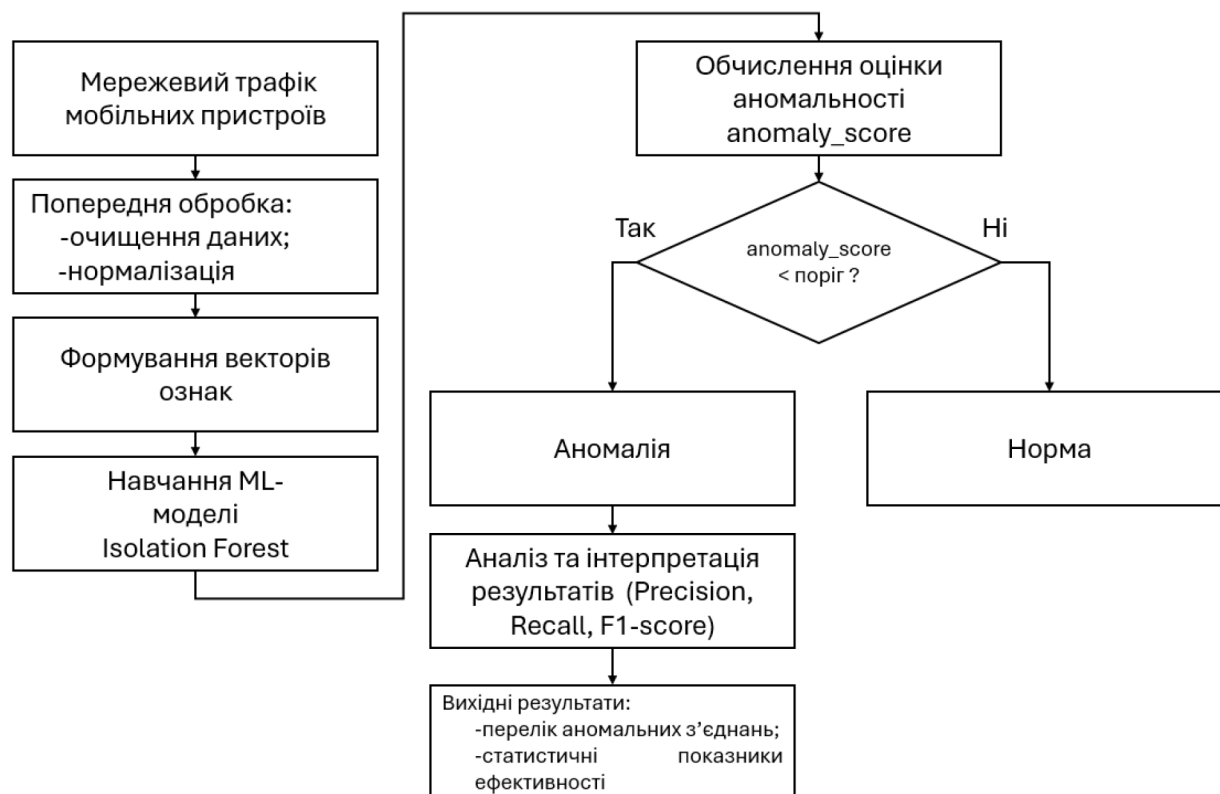


Рис. 1. Блок-схема процесу автоматизованого виявлення аномалій у мережевому трафіку мобільних пристроїв на основі алгоритму Isolation Forest

Джерело: авторська розробка

Таблиця 1

Порівняльні характеристики алгоритмів машинного навчання для виявлення аномалій у мобільному трафіку

Алгоритм	Точність (%)	Час навчання (с)	F1-міра	Складність
Isolation Forest	94.2	12.4	0.91	Середня
One-Class SVM	91.8	45.3	0.88	Висока
LSTM Autoencoder	96.1	120.7	0.94	Висока
Random Forest	92.5	18.2	0.89	Середня
K-Means	87.3	8.1	0.82	Низька

Джерело: авторська розробка

Як видно з табл. 1, алгоритм LSTM Autoencoder демонструє найвищу точність виявлення аномалій (96,1 %), однак характеризується підвищеними обчислювальними витратами та більшим часом навчання. Водночас метод Isolation Forest забезпечує кращий компроміс між точністю та швидкістю, що робить його придатним для застосування в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

З огляду на необхідність раннього виявлення загроз, на що вказує Thwaini M. H. [9, с. 72], у межах дослідження було проаналізовано кілька алгоритмів машинного навчання з різними характеристиками. Узагальнюючий огляд, наведений у роботі Mahmood N., Hussein D. H., Askar S., Ibrahim M. A. [10, с. 4], підтверджує відсутність універсального підходу до задачі виявлення мережевих аномалій, що обґрунтовує доцільність порівняльного аналізу моделей.

Висновки

Результати дослідження підтверджують доцільність застосування методів машинного навчання для виявлення аномалій у мережевому трафіку мобільних пристроїв.

У роботі виконано аналіз і порівняння підходів на основі LSTM Autoencoder та алгоритму Isolation Forest, які дають змогу виявляти раніше невідомі загрози без використання великих розмічених наборів даних. Експериментальні результати показали, що LSTM Autoencoder забезпечує найвищу точність детектування аномалій (96,1 %), однак потребує значних обчислювальних ресурсів і тривалого часу навчання, що може обмежувати застосування в системах реального часу.

Водночас алгоритм Isolation Forest забезпечує оптимальний баланс між швидкістю та точністю (94,2 %), що робить його доцільним для використання в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення гібридних підходів, які поєднуюватимуть високу точність глибоких нейронних мереж із швидкістю та ресурсною ефективністю класичних алгоритмів машинного навчання.

Список використаної літератури

1. Neri M., Baldoni S. Unsupervised Network Anomaly Detection with Autoencoders and Traffic Images (Version 1). arXiv. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.16650> URL: <https://arxiv.org/abs/2505.16650>
2. Singh K., Kashyap A., Cherukuri A. K. Interpretable Anomaly Detection in Encrypted Traffic Using SHAP with Machine Learning Models (Version 1). arXiv. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.16261> URL: <https://arxiv.org/abs/2505.16261>
3. Miguel-Diez A., Campazas-Vega A., Guerrero-Higuera A. M., Álvarez-Aparicio C., Matellán-Olivera V. Anomaly detection in network flows using unsupervised online machine learning (Version 1). arXiv. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.01375> URL: <https://arxiv.org/abs/2509.01375>
4. Noonari N., Corujo D., Aguiar R. L., Ferrao F. J. Multi-Scale Convolutional LSTM with Transfer Learning for Anomaly Detection in Cellular Networks (Version 1). arXiv. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.03732> URL: <https://arxiv.org/abs/2410.03732>
5. Chen Z., Chien S. W. D., Qian P., Zilberman N. Detecting Anomalies in Machine Learning Infrastructure via Hardware Telemetry (Version 1). arXiv. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.26008> URL: <https://arxiv.org/abs/2510.26008>
6. Benmachiche A., Rais K., Slimi H. Real-Time Machine Learning for Embedded Anomaly Detection (Version 1). arXiv. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.19383> URL: <https://arxiv.org/abs/2512.19383>
7. Rzym G., Masny A., Cholda P. Dynamic Telemetry and Deep Neural Networks for Anomaly Detection in 6G Software-Defined Networks. Electronics. 2024. Vol. 13, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13020382> URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/2/382>
8. Schummer P., del Rio A., Serrano J., Jimenez D., Sánchez G., Llorente Á. Machine Learning-Based Network Anomaly Detection: Design, Implementation, and Evaluation. AI. 2024. Vol. 5, No. 4. P. 143. DOI: <https://doi.org/10.3390/ai5040143> URL: <https://www.mdpi.com/2673-2688/5/4/143>
9. Thwaini M. H. Anomaly Detection in Network Traffic using Machine Learning for Early Threat Detection. Digital Medicine. 2022. DOI: [10.56294/dm202272](https://doi.org/10.56294/dm202272) URL: <https://is.gd/T2JCaF>
10. Mahmood N., Hussein D. H., Askar S., Ibrahim M. A. Machine Learning for Network Anomaly Detection: A Review. International Journal of Computer Science. 2025. Vol. 14, No. 1. DOI: [10.33022/ijcs.v14i1.4703](https://doi.org/10.33022/ijcs.v14i1.4703) URL: <https://is.gd/mYVrU5>

References

1. Neri, M., & Baldoni, S. (2025). Unsupervised Network Anomaly Detection with Autoencoders and Traffic Images (Version 1). arXiv. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.16650> Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2505.16650> [in English].
2. Singh, K., Kashyap, A., & Cherukuri, A. K. (2025). Interpretable Anomaly Detection in Encrypted Traffic Using SHAP with Machine Learning Models (Version 1). arXiv. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.16261> Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2505.16261> [in English].
3. Miguel-Diez, A., Campazas-Vega, A., Guerrero-Higuera, A. M., Álvarez-Aparicio, C., & Matellán-Olivera, V. (2025). Anomaly detection in network flows using unsupervised online machine learning (Version 1). arXiv. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.01375> Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2509.01375> [in English].
4. Noonari, N., Corujo, D., Aguiar, R. L., & Ferrao, F. J. (2024). Multi-Scale Convolutional LSTM with Transfer Learning for Anomaly Detection in Cellular Networks (Version 1). arXiv. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.03732> Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2410.03732> [in English].
5. Chen, Z., Chien, S. W. D., Qian, P., & Zilberman, N. (2025). Detecting Anomalies in Machine Learning Infrastructure via Hardware Telemetry (Version 1). arXiv. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.26008> Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2510.26008> [in English].
6. Benmachiche, A., Rais, K., & Slimi, H. (2025). Real-Time Machine Learning for Embedded Anomaly Detection (Version 1). arXiv. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.19383> Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2512.19383> [in English].
7. Rzym, G., Masny, A., & Cholda, P. (2024). Dynamic Telemetry and Deep Neural Networks for Anomaly Detection in 6G Software-Defined Networks. Electronics, 13(2). DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13020382> Retrieved from <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/2/382> [in English].

8. Schummer, P., del Rio, A., Serrano, J., Jimenez, D., Sánchez, G., & Llorente, Á. (2024). Machine Learning-Based Network Anomaly Detection: Design, Implementation, and Evaluation. *AI*, 5(4), 2967–2983. DOI: <https://doi.org/10.3390/ai5040143> Retrieved from <https://www.mdpi.com/2673-2688/5/4/143> [in English].
9. Thwaini, M. H. (2022). Anomaly Detection in Network Traffic using Machine Learning for Early Threat Detection. *Digital Medicine*. DOI: 10.56294/dm202272 Retrieved from <https://is.gd/T2JCaF> [in English].
10. Mahmood, N., Hussein, D. H., Askar, S., & Ibrahim, M. A. (2025). Machine Learning for Network Anomaly Detection: A Review. *International Journal of Computer Science*, 14(1). DOI: 10.33022/ijcs.v14i1.4703 Retrieved from <https://is.gd/mYVrU5> [in English].

Дата першого надходження статті до видання: 10.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

Т. Г. СТАРУШЕНКО

аспірант кафедри кібербезпеки

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID: 0009-0008-9226-4666

ІНФОРМАЦІЙНА ЕНТРОПІЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СТАНДАРТІВ IEEE 754: ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ПРАКТИЧНІ НАСЛІДКИ

У статті запропоновано оригінальний підхід до дослідження числових форматів стандарту IEEE 754 крізь призму теорії інформації Шеннона. На відміну від традиційних досліджень, що розглядають формати IEEE 754 виключно з точки зору обчислювальної точності або швидкодії, у даній роботі вперше систематично досліджено інформаційно-ентропійні характеристики кожного функціонального поля цих форматів – знакового біта, поля порядку та поля мантиси. Запропоновано авторське визначення поняття «питомої ентропійної ефективності» (ПЕЕ) числового формату як метрики, що дозволяє кількісно порівнювати інформаційну насиченість різних форматів подання дійсних чисел. Проведено детальний ентропійний аналіз чотирьох стандартних форматів – `binary16`, `binary32`, `binary64` та `binary128` – з урахуванням специфіки денормалізованих чисел, множинного кодування нуля, семантичної надмірності значень NaN. Вперше систематично класифіковано чотири джерела ентропійної надмірності у форматах IEEE 754 та оцінено їх відносний внесок. Встановлено аналітичну залежність між розрядністю поля порядку та рівнем NaN-надмірності формату. Виявлено та кількісно охарактеризовано прояв закону Бенфорда у бінарних числових форматах: нерівномірний розподіл старших біт мантиси створює потенціал стиснення близько 2 % на біт мантиси. Результати дослідження утворюють теоретичну основу для проектування нових числових форматів з оптимальними інформаційними характеристиками, зокрема для нейромережових прискорювачів та систем обробки великих числових масивів.

Ключові слова: інформаційна ентропія; IEEE 754; числа з рухомою крапкою; питома ентропійна ефективність; ентропія Шеннона; NaN-надмірність; денормалізовані числа; закон Бенфорда; стиснення числових даних; нейромережові формати.

Т. Н. STARUSHENKO

Postgraduate Student at the Department of Cybersecurity

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ORCID: 0009-0008-9226-4666

INFORMATION ENTROPY OF IEEE 754 COMPUTING STANDARDS: THEORETICAL ANALYSIS AND PRACTICAL IMPLICATIONS

This paper proposes an original approach to the study of IEEE 754 floating-point number formats through the lens of Shannon's information theory. Unlike traditional research that examines IEEE 754 formats exclusively from the perspective of computational accuracy or hardware efficiency, this work systematically investigates the information-entropy characteristics of each functional field – the sign bit, the exponent field, and the mantissa field. An original metric called “specific entropy efficiency” (SEE) is proposed to quantitatively compare the information density of different floating-point formats. A detailed entropy analysis of four standard formats – `binary16`, `binary32`, `binary64`, and `binary128` – is conducted, accounting for the specifics of denormalized numbers, dual zero encoding, and the semantic redundancy of NaN values. For the first time, four sources of entropy redundancy in IEEE 754 are systematically classified and an analytical dependence between exponent field width and NaN-redundancy level is established. A binary analogue of Benford's law in IEEE 754 formats is identified and quantified: non-uniform distribution of the upper mantissa bits creates a compression potential of approximately 2 % per mantissa bit. The results provide a theoretical foundation for designing new numerical formats with optimal information characteristics, particularly for neural network accelerators and large-scale numerical data processing systems.

Key words: information entropy; IEEE 754; floating-point numbers; specific entropy efficiency; Shannon entropy; NaN redundancy; denormalized numbers; Benford's law; numerical data compression; neural network formats.



Постановка проблеми

Стандарт IEEE 754 з'явився у 1985 році [6], відтоді пережив дві редакції – у 2008 та 2019 роках – і фактично став єдиною мовою, якою процесори розмовляють про дійсні числа. Більшість наукових праць крутиться навколо двох тем: точність подання та швидкість апаратних операцій. Ентропійний вимір при цьому залишається поза увагою.

Шеннон у своїй праці 1948 року [1] показав: будь-яка система кодування має ентропійну межу – максимальну кількість інформації, яку можна закодувати в одному символі. Якщо кодування неоптимальне, частина місця витрачається даремно. Питання в тому, чи є IEEE 754 таким неоптимальним кодуванням – і якщо так, то де саме.

Практична мотивація цілком конкретна. Сучасне машинне навчання оперує форматами зниженої розрядності – bfloat16, TF32, FP8 [9]. Вибір між ними досі здійснюється методом спроб і помилок. Теоретично обґрунтований ентропійний аналіз міг би замінити цей підхід на щось більш раціональне.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Теорія, на яку спирається це дослідження, сходить до Шеннона [1]. Введена ним ентропія H – не просто формула, а фундаментальна межа стисненості будь-якого джерела даних. Голдберг [2] зробив для IEEE 754 те, що давно мало бути зроблено: систематично описав усі підводні камені арифметики з рухомою крапкою. Його робота досі є обов'язковим читанням – але питання ентропії в ній не піднімається взагалі.

Лерч зі співавторами [3] виявили цікавий факт: у реальних наукових розрахунках числа розподілені зовсім не рівномірно по діапазону формату. Це спостереження прямо натякає на ентропійну неефективність, але автори зупинились на статистиці, не перейшовши до теоретичних висновків. Ліндстром [4] пішов далі і розробив алгоритм стиснення числових масивів, який фактично використовує нерівномірний розподіл ентропії між полями IEEE 754 – щоправда, не усвідомлюючи цього явно.

Закон Бенфорда [5] відомий у контексті десяткових чисел, але його прояв у двійковому поданні практично не вивчався. Мюллер та ін. [7] і Хайем [8] написали ґрунтовні монографії з арифметики та чисельних методів, проте ентропійний кут зору в обох відсутній. Власне, саме цю нішу і заповнює дана робота.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи – побудувати інформаційно-теоретичну модель числових форматів IEEE 754, запропонувати метрику для оцінювання їх ентропійної ефективності та виявити й кількісно охарактеризувати джерела надмірності в цих форматах. Для цього необхідно: формально визначити ентропію числового формату та його полів; запропонувати метрику питомої ентропійної ефективності (ПЕЕ); скласти класифікацію джерел надмірності і оцінити внесок кожного; дослідити прояв закону Бенфорда у двійкових числових форматах; перекласти теоретичні висновки мовою практичних рекомендацій.

Викладення основного матеріалу дослідження

Формалізація ентропійної моделі числового формату.

Будь-який формат з рухомою крапкою зручно описати як трійку $F = (s, e, f)$: знаковий біт s , поле порядку e завширшки e_b біт і поле мантиси f завширшки f_b біт. Разом – $n = 1 + e\_b + f\_b$ біт. Кожна з 2^n бітових комбінацій відповідає певному елементу множини $V(F)$ – нормалізованому числу, денормалізованому числу, нулю, нескінченності або NaN.

Якщо позначити через $P(v)$ імовірність появи значення v у деякому числовому потоці, то ентропія формату відносно цього розподілу:

$$(F, P) = - \sum_{v \in V(F)} P(v) \cdot \log_2 P(v) [\text{біт}].$$

Верхня межа – максимальна ентропія $H_{\max}(F) = \log_2 |V(F)|$ – досягається при рівномірному розподілі по всіх семантично різних значеннях. Відношення цієї межі до загальної розрядності n є метрикою питомої ентропійної ефективності:

$$ПЕЕ(F) = \frac{H_{\max}(F)}{n} \cdot 100 \, \%.$$

Інтерпретація проста: $ПЕЕ = 100 \, \%$ означає, що кожна бітова комбінація несе унікальне семантичне навантаження. Будь-яке відхилення вниз – це структурна надмірність, тобто марно витрачені біти.

Архітектура форматів та параметри полів.

Нормалізоване число у форматі IEEE 754 обчислюється за формулою:

$$x = (-1)^s \cdot 2^{e-bias} \cdot \left(1 + \frac{f}{2^{f_b}}\right),$$

де $bias = 2^{e\_b - 1} - 1$. Одиниця перед крапкою у мантисі не зберігається явно – вона неявна. Це означає, що формат отримує один безкоштовний додатковий біт точності. Параметри чотирьох стандартних форматів зведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри форматів IEEE 754

Формат	n (біт)	e_b (біт)	f_b (біт)	$bias$
binary16	16	5	10	15
binary32	32	8	23	127
binary64	64	11	52	1023
binary128	128	15	112	16 383

Таблиця 2

Ентропійні характеристики форматів IEEE 754

Формат	n (біт)	N_NaN	H_max (біт)	ПЕЕ (%)
binary16	16	2 046	15,948	99,67
binary32	32	16 777 214	31,988	99,96
binary64	64	$\approx 9,0 \cdot 10^{15}$	63,997	99,996
binary128	128	$\approx 3,4 \cdot 10^{34}$	127,999	99,999

Класифікація джерел ентропійної надмірності.

Аналіз специфікації [6] дозволяє виділити чотири принципово різних джерела, через які ПЕЕ форматів IEEE 754 виявляється меншою за 100 %.

Перше – подвійний нуль. У стандарті існують +0 і -0 як дві окремі бітові комбінації, хоча математично це одне й те саме число. Відносна надмірність $\delta_1 = 1/n$ невелика, але для binary16 з її 16 бітами помітніша, ніж для binary128.

Друге – NaN. Значення «не число» кодується будь-якою комбінацією, де поле порядку суцільно з одиниць, а мантиса ненульова. Таких комбінацій рівно $N\_NaN = 2 \cdot (2^{f\_b} - 1) - i$ всі вони семантично тотожні. Для binary32 це понад 16 мільйонів комбінацій на одне «значення». $N\_NaN/2^n \approx 2^{-(1-e\_b)}$ – отже, чим ширше поле порядку, тим менша частка NaN-надмірності.

Третє джерело – денормалізовані числа. Вони несуть менше значущих розрядів за ту саму кількість біт і знижують середню інформативність кодових комбінацій без класичної надмірності.

Четверте – нерівномірний розподіл ентропії між полями. Знаковий біт, поле порядку і мантиса несуть різну кількість інформації на один біт, і жодне перекодування між ними неможливе без втрати семантики.

Кількісний аналіз питомої ентропійної ефективності.

Підрахуємо $|V(F)| = 2^n - N\_NaN - 1$ та обчислимо ПЕЕ для кожного формату. Результати – в табл. 2.

Закономірність з табл. 2 очевидна: зі зростанням розрядності ПЕЕ наближається до 100 %, причому головним чинником є саме e_b . Оскільки $N\_NaN/2^n \approx 2^{-(1-e\_b)}$, справедлива наближена формула:

$$ПЕЕ \approx 100 \% - 2^{1-e_b} \cdot 100 \%$$

Саме тому binary16 з $e\_b = 5$ має найнижчу ПЕЕ серед чотирьох форматів.

Ентропійний профіль окремих полів.

Знаковий біт – бернуллівська змінна з ентропією $H(s) = -p \cdot \log_2 p - (1-p) \cdot \log_2 (1-p)$, де p – частка від'ємних чисел. В типових інженерних задачах від'ємні числа рідкісніші, $p < 0,5$. При $p = 0,1$ маємо $H(s) \approx 0,469$ біт – менше половини від максимуму 1 біт. Потенціал стиснення знакового поля в таких умовах майже дворазовий.

Поле порядку – найцікавіший випадок. Для binary64 теоретично доступні порядки від -1022 до +1023 – 2046 значень, $H\_max(e) \approx 10,998$ біт. Але в реальній задачі з числами в діапазоні $10^{-5} \dots 10^3$ задіяні лише порядки від -17 до +10, тобто 28 значень. Фактична ентропія: $\log_2(28) \approx 4,81$ біт – менше 44 % від теоретичного максимуму. Поле порядку є головним резервом для стиснення.

Мантиса при фіксованому порядку розподілена близько до рівномірного – емпіричні дані [3] підтверджують ентропію 90–98 % від максимуму. Саме тому мантису так важко стискати без втрат.

Закон Бенфорда у двійковому просторі.

Закон Бенфорда [5] – це про нерівномірність перших цифр у природних числових наборах. У десятковій системі одиниця трапляється першою у ~30 % випадків, дев'ятка – лише у ~4,6 %. Причина – масштабна інваріантність: якщо розподіл рівномірний на логарифмічній шкалі, старші розряди автоматично нерівномірні.

У форматах IEEE 754 це явище специфічне. Перший значущий біт нормалізованої мантиси завжди одиниця і не зберігається. Але вже другий біт зміщений: для рівномірного на log-шкалі розподілу в межах октави $[2^k, 2^{k+1})$ він дорівнює 1 приблизно у 58,5 % випадків, а не у 50 %. Це і є двійковий аналог закону Бенфорда – і він, наскільки відомо автору, раніше не описувався у прив'язці до форматів IEEE 754.

Підрахуємо наслідки. Ентропія цього біта: $H(0,585) \approx 0,980$ біт замість 1 біт – втрата 0,020 біт/біт. Для масиву з 10^8 чисел binary64 це $0,020 \cdot 52 \cdot 10^8/8 \approx 13$ МБ потенційної компресії лише за рахунок одного біта.

Практичні наслідки аналізу.

Стискати числові масиви треба диференційовано. Поле порядку – різницеvim або предиктивним кодуванням, бо в межах однієї задачі воно повторюється і змінюється передбачувано. Мантису – ентропійним кодером з урахуванням нерівномірності старших біт. Знаковий біт – окремо, зі своїм апіорним розподілом.

При розробці нових форматів метрика ПЕЕ дає об'єктивний критерій для вибору співвідношення e_b/f_b . Збільшення e_b підвищує ПЕЕ і динамічний діапазон, але коштом точності мантиси – компроміс залежить від задачі. У задачах з відомим діапазоном значень варто розглядати зміщений порядок – де всі біти поля є зосереджені на реально використовуваному піддіапазоні. Це підтягує фактичну ентропію поля порядку до теоретичного максимуму без жодних змін у мантисі.

Висновки

Проведений аналіз дозволяє стверджувати наступне. Формати IEEE 754 є дуже ефективними з інформаційної точки зору – ПЕЕ для всіх чотирьох стандартних форматів перевищує 99,6 %. Але майже ідеальне не означає ідеальне, і джерела надмірності цілком реальні.

Запропонована метрика ПЕЕ – простий і зручний інструмент порівняння числових форматів. Вона зводить складну ентропійну картину до одного числа і обчислюється аналітично. Встановлена залежність $ПЕЕ \approx 100 \% - 2^{(1 - e\_b)} \cdot 100 \%$ пояснює, чому binary16 є помітно менш ефективним за binary64.

Виявлений двійковий аналог закону Бенфорда – зміщення другого біта мантиси до значення 1 з імовірністю ~58,5 % – відкриває конкретний потенціал стиснення: близько 13 МБ на мільярд чисел у форматі binary64. Рекомендації щодо диференційованого стиснення полів, проектування форматів за критерієм ПЕЕ та застосування зміщеного порядку є безпосереднім прикладним результатом. Подальші дослідження можуть розвинути ці ідеї у конкретні алгоритми та верифікувати їх на реальних числових потоках.

Список використаної літератури

1. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27, No. 3. Pp. 379–423.
2. Goldberg D. What every computer scientist should know about floating-point arithmetic. ACM Computing Surveys. 1991. Vol. 23, No. 1. Pp. 5–48.
3. Lehr J., Hintz J., Bertone A. Statistical distribution of floating-point numbers in scientific computing. Journal of Computational Science. 2019. Vol. 35. Pp. 28–37.
4. Lindstrom P. Fixed-Rate Compressed Floating-Point Arrays. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2014. Vol. 20, No. 12. Pp. 2674–2683.
5. Benford F. The law of anomalous numbers. Proceedings of the American Philosophical Society. 1938. Vol. 78, No. 4. Pp. 551–572.
6. IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic. IEEE Std 754-2019. New York : IEEE, 2019. 84 p.
7. Muller J.-M. et al. Handbook of Floating-Point Arithmetic. 2nd ed. Birkhäuser, 2018. 627 p.
8. Higham N. J. Accuracy and Stability of Numerical Algorithms. 2nd ed. Philadelphia : SIAM, 2002. 680 p.
9. Kalamkar D. et al. A Study of BFLOAT16 for Deep Learning Training. arXiv:1905.12322. 2019. 8 p.

References

1. Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal, 27(3), 379–423.
2. Goldberg, D. (1991). What every computer scientist should know about floating-point arithmetic. ACM Computing Surveys, 23(1), 5–48.
3. Lehr, J., Hintz, J., & Bertone, A. (2019). Statistical distribution of floating-point numbers in scientific computing. Journal of Computational Science, 35, 28–37.
4. Lindstrom, P. (2014). Fixed-Rate Compressed Floating-Point Arrays. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 20(12), 2674–2683.
5. Benford, F. (1938). The law of anomalous numbers. Proceedings of the American Philosophical Society, 78(4), 551–572.
6. IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic, IEEE Std 754-2019. (2019). New York: IEEE.
7. Muller, J.-M. et al. (2018). Handbook of Floating-Point Arithmetic (2nd ed.). Birkhäuser.
8. Higham, N. J. (2002). Accuracy and Stability of Numerical Algorithms (2nd ed.). Philadelphia : SIAM.
9. Kalamkar, D. et al. (2019). A Study of BFLOAT16 for Deep Learning Training. arXiv:1905.12322.

Дата першого надходження статті до видання: 13.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

А. В. СТЬОПКІН

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри математики, фізики та інформатики
ДВНЗ «Донбаський державний педагогічний університет»
ORCID: 0000-0002-6130-9920

АЛГОРИТМ РОЗПІЗНАВАННЯ ГРАФІВ КОЛЕКТИВОМ АГЕНТІВ

Робота присвячена проблемі розпізнавання скінчених зв'язних неорієнтованих графів без петель та кратних ребер колективом агентів. Метою роботи є розробка нового методу розпізнавання неорієнтованих графів колективом агентів та побудова алгоритму, що базується на цьому методі. В роботі запропоновано наступну методологію до досягнення поставленої мети. Для розпізнавання використовується два агенти: нерухомий агент – агент-експериментатор, що знаходиться поза межами графа та виконує побудову мапи досліджуваного графа у вигляді списків ребер та вершин. Обчислення виконуються на базі повідомлень, які він отримує від іншого агента. Агент-експериментатор має скінчену на кожному кроці, але необмежено зростаючу внутрішню пам'ять. Другий агент – агент-дослідник, що представлений у вигляді мобільного агента, який може рухатися досліджуванним графом, зчитувати та змінювати відмітки на елементах графа, а також відправляти повідомлення агенту-експериментатору. Під час роботи агент-дослідник фарбуватиме необхідні елементи графа в чорний колір і наприкінці роботи всі елементи графа будуть пофарбовані. Агент-дослідник має скінчену пам'ять, яка не залежить від розмірності досліджуваного графа та використовує одну чорну фарбу. Функціонування колективу агентів забезпечується взаємодією двох принципово різних алгоритмів: алгоритму обходу графа агентом-дослідником та алгоритму побудови мапи графа агентом-експериментатором. Науковою новизною є отримання нового методу та алгоритму розпізнавання графів колективом агентів, який дозволяє використовувати для розпізнавання графів лише одну фарбу та дає можливість в подальшому використати даний алгоритм як основу для використання більшої кількості агентів-дослідників. Алгоритм має кубічну часову, квадратичну ємнісну та кубічну комунікаційну складності алгоритму розпізнавання, при цьому верхня оцінка числа переходів по ребрах, що здійснює агент-дослідник оцінюється як $O(n^3)$.

Ключові слова: розпізнавання графа, неорієнтований граф, колектив агентів, складність розпізнавання, обхід графа в глибину.

A. V. STOPKIN

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mathematics, Physics and Informatics
State Higher Educational Institution "Donbas State Pedagogical University"
ORCID: 0000-0002-6130-9920

GRAPH EXPLORATION ALGORITHM BY A TEAM OF AGENTS

This paper addresses the problem of the graph exploration of finite connected undirected graphs without loops and multiple edges by a team of agents. The aim of the study is to develop a new method for the exploration of undirected graphs by a team of agents and to construct an algorithm based on this method. The following methodology is proposed to achieve the stated objective. The exploration process involves two agents. The first one is a stationary agent – the agent-experimenter – located outside the graph and responsible for constructing a map of the explored graph in the form of node and edge lists. All computations are performed on the basis of messages received from the second agent. The agent-experimenter possesses finite memory at each step, which may grow without bound over time. The second agent – the agent-researcher – is a mobile agent capable of traversing the explored graph, reading and modifying marks on graph elements, and sending messages to the agent-experimenter. During the execution of the algorithm, the agent-researcher colors the explored graph elements black, and upon completion all graph elements are colored. The agent-researcher has finite memory independent of the size of the explored graph and uses a single black color. The functioning of the agent team is ensured by the interaction of two fundamentally different algorithms: a graph traversal algorithm executed by the agent-researcher and a graph mapping algorithm executed by the agent-experimenter. The scientific novelty of the work lies in the development of a new method and algorithm for graph exploration by a team of agents that requires only a single color for exploration and can serve as a foundation for further extensions involving multiple agent-researchers. The algorithm has cubic time complexity, quadratic space complexity, and cubic communication complexity for the graph exploration problem. The upper bound on the number of edge traversals performed by the agent-researcher is estimated as $O(n^3)$.

Key words: graph exploration, undirected graph, mobile agent, exploration complexities, depth-first traversal method.



Постановка проблеми

В наш час досить важливою проблемою кібернетики, якій приділяється особлива увага, залишається проблема взаємодії керованої та керуючої систем. В цій статті ми розглядаємо цю взаємодію як процес переміщення мобільного агента деяким середовищем, яке можна представити у вигляді скінченного неорієнтованого графа [1, 2]. Зрозуміло, що для можливості подібного переміщення мобільного агента операційним середовищем, повинна існувати достатньо повна модель даного середовища. Інакше цілеспрямоване переміщення агента по цьому середовищу буде неможливе. В питаннях моделювання операційних середовищ визначено ряд підходів, одним з яких є топологічний. В такому випадку агенту доступна інформація тільки про зв'язки між різними частинами середовища та недоступна метрична та алгоритмічна інформація про дане середовище [3]. Подібні ситуації досить часто виникають в робототехніці [4].

Метою роботи є побудова ефективного алгоритму розпізнавання невідомих скінчених неорієнтованих графів колективом агентів [5–7] та дослідження часової, ємнісної та комунікаційної складностей, а також кількості переходів по ребрах, які необхідно здійснити мобільному агенту, що рухається графом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Залишаються актуальними дослідження поведінки агентів при виконанні завдань в деяких середовищах [1, 2, 5, 6, 8, 9]. Одним з них є завдання розпізнавання графів мобільними агентами [1, 2, 10], але дедалі більш популярними стають дослідження присвячені вивченню поведінки саме колективів агентів при роботі на графах [5–9]. При цьому детально аналізуються ключові аспекти, притаманні функціонуванню таких систем: проблема керування колективом агентів [11], проблема формування колективу агентів [12] та проблема консенсусу мультиагентної системи [13].

Формулювання мети дослідження

Як можна бачити, сучасні дослідження демонструють стабільний інтерес до проблеми розпізнавання графів мобільними агентами, що зумовлено широким спектром практичних застосувань та теоретичною складністю задачі. Особлива увага приділяється питанням побудови маршрутів руху агентів у невідомому середовищі, локальної розмітки його елементів, збору та обробки інформації в умовах обмежених ресурсів, формування повного представлення графа на основі локальних спостережень. А також питанням, пов'язаним з функціонуванням колективів агентів, таким як проблема керування колективом, проблема формування колективу та проблема консенсусу мультиагентної системи. Не менш важливими залишаються задачі мінімізації витрат часу, пам'яті та інших ресурсів, що використовуються під час розпізнавання.

Метою даної роботи є розробка та дослідження ефективного методу розпізнавання графів, а також створення алгоритму, що реалізує запропонований метод. У роботі планується дослідити часову, ємнісну та комунікаційну складності, а також кількість переходів по ребрах графа, які необхідно здійснити мобільному агенту для повного розпізнавання графа. Під ефективністю методу розуміється зменшення ресурсних витрат або покращення верхніх оцінок складності у порівнянні з відомими результатами, представленими в попередніх дослідженнях [7,14,15].

Викладення основного матеріалу дослідження

В роботі розглядаються скінчені, неорієнтовані графи без петель та кратних ребер. Нехай $G = (V, E)$ – граф, у якого V – множина вершин, E – множина ребер. Під ребрами ми будемо розуміти двоелементні підмножини (v, u) , де $u, v \in V$. Трійку $((v, u), u)$ будемо називати інцидентором ребра (v, u) та вершини u . Інцидентор p суті є точкою з'єднання ребра з вершиною. Множину інциденторів позначимо I . Множину $L = V \cup E \cup I$ назвемо множиною всіх елементів графа G . Функцією розфарбування графа G назвемо сюр'єктивне відображення $\mu : L \rightarrow \{w, b\}$, де w – білий колір, а b – чорний. Пара (G, μ) називається розфарбованим графом. Послідовність $u_1, u_2, \dots, u_k$ попарно суміжних вершин називається шляхом в графі G , а k – довжиною шляху. За умови $u_1 = u_k$ шлях називається циклом. Околом $Q(v)$ вершини v будемо називати множину елементів графа, що складається з вершини v , всіх вершин u суміжних з v , всіх ребер (v, u) та всіх інциденторів $((v, u), v), ((v, u), u)$. Потужність множин вершин V і ребер E позначимо через n і m відповідно. Зрозуміло, що $m \leq \frac{n(n-1)}{2}$. Ізоморфізмом графа G і графа H назвемо таку бієкцію: $\phi : V_G \rightarrow V_H$, що $(v, u) \in E_G$ тоді й тільки тоді, коли $(\phi(v), \phi(u)) \in E_H$. Таким чином, ізоморфні графи рівні з точністю до позначення вершин і розфарбування їх елементів.

Для розпізнавання графів використовується два агенти: нерухомий агент – агент-експериментатор, що знаходиться поза межами графа та виконує всі обчислення, які необхідні для побудови мапи досліджуваного графа. Обчислення виконуються на базі повідомлень, які він отримує від іншого агента. Агент-експериментатор має скінчену на кожному кроці, але необмежено зростаючу внутрішню пам'ять. Другий агент – агент-дослідник, що представлений у вигляді мобільного агента, який може рухатися досліджуваним графом, зчитувати та змінювати відмітки на елементах графа, а також відправляти повідомлення про свої дії агенту-експериментатору. Агент-дослідник має скінчену пам'ять, яка не залежить від розмірності досліджуваного графа та використовує одну чорну фарбу.

Функціонування колективу агентів забезпечується взаємодією двох принципово різних алгоритмів: алгоритму обходу графа агентом-дослідником та алгоритму побудови мапи графа агентом-експериментатором. Ця

взаємодія відбувається наступним чином: агент-дослідник виконує деяку дію з алгоритму обходу та відправляє повідомлення агенту-експериментатору, повідомлення обробляється та, за необхідності, відправляється відповідь агенту-досліднику, далі агент-дослідник знову робить крок і т.д.

На початку роботи алгоритму всі елементи графа пофарбовані в чорний колір. Далі агент-дослідник розміщується в довільній вершині графа і одразу зафарбовує її в чорний колір, а агент-дослідник додає до своєї пам'яті першу вершину. Під час роботи агент-дослідник фарбуватиме необхідні елементи в чорний колір і наприкінці роботи всі елементи графа будуть пофарбовані.

Для зручності читання наведемо принцип функціонування колективу агентів за допомогою режимів, після чого наведемо безпосередньо самі алгоритми роботи різних агентів. При описі режимів функціонування мульти-агентної системи ми будемо зазначати повідомлення, які відправляються агентом-дослідником агенту-експериментатору у форматі: «Message», де Message – текст повідомлення. Також поточною вершиною будемо називати вершину, в якій знаходиться агент-дослідник.

На початку роботи агент-дослідник працює в *звичайному режимі роботи*. Він сканує окіл поточної вершини, знаходить білі вершини, до яких ведуть білі ребра з білими інциденторами і переходить по цим ребрам у знайдені вершини, фарбуючи при цьому пройдені ребра, дальні інцидентори та вершину, в яку він потрапив в чорний колір. На кожному кроці агенту-експериментатору відправляється повідомлення «Forward». Завдяки чому агент-дослідник додає в свою пам'ять до множин V і E нові вершини та ребра відповідно. Якщо при роботі в звичайному режимі агент-дослідник знаходить біле ребро з білими ближнім та дальніми інциденторами, яке веде в чорну вершину, то це означає, що знайдено зворотне ребро. В такому випадку агент-дослідник призупиняє роботу в звичайному режимі та перемикається в режим розпізнавання зворотних ребер, в якому функціонуватиме до того моменту, поки не розпізнає всі зворотні ребра з поточної вершини. Після чого знову буде активовано звичайний режим роботи. Зрозуміло, враховуючи, що граф скінчений настане момент, коли в околі поточної вершини не виявиться білих вершин до яких ведуть білі ребра. В такому випадку агент-дослідник сканує окіл поточної вершини, знаходить чорне ребро з ближнім чорним інцидентором, яке веде в чорну вершину і починає рух назад по таким ребрам, фарбуючи дальні інцидентори в чорний колір і відправляючи агенту-експериментатору кожен такий крок повідомлення «Back». Це відбувається до тих пір, поки в поточній вершині не виявиться ще не розпізнаних вершин та ребер, в яких знову почнеться рух агента-дослідника вперед. Якщо ж рухаючись назад агент-дослідник потрапив в стартову вершину і в її околі відсутні нерозпізнані елементи графа, він відправляє агенту-експериментатору повідомлення «Stop» і завершує роботу, так як досліджуваний граф повністю розпізнано. В цей момент агент-експериментатор в своїй пам'яті вже має повний перелік вершин та ребер досліджуваного графа у вигляді списку ребер та списку вершин.

Режим розпізнавання зворотних ребер. Як вже зазначалось вище під час роботи в звичайному режимі агент-дослідник може зустріти так зване зворотне ребро (біле ребро з білими ближнім та дальнім інциденторами, що веде в чорну вершину). Зустрівши таке ребро, агент-дослідник, одразу перемикається в режим розпізнавання зворотних ребер. Він переходить по знайденому ребру, фарбуючи його та дальній інцидентор в чорний колір. Після чого повертається по своєму раніше пройденому шляху в вершину, з якої почав розпізнавання зворотного ребра. На кожному кроці цього руху він відправляє агенту-експериментатору повідомлення «Forward_ie». Повідомлення відправляється для підрахунку кількості кроків, які агенту-досліднику необхідно зробити назад для потрапляння у дальню вершину поміченого зворотного ребра. Знання кількості кроків дозволить агенту-експериментатору обчислити номер дальньої вершини поміченого зворотного ребра, який необхідно знати щоб додати зворотне ребро в множину ребер. Повернувшись у вершину з якої розпочалося розпізнавання зворотного ребра, агент-дослідник зафарбовує ближній інцидентор цього ребра та відправляє повідомлення «Add_ie». Агент-експериментатор, отримавши це повідомлення, визначає номер дальньої вершини зворотного ребра та додає ребро в список в список ребер у своїй пам'яті. Після чого, агент-дослідник перевіряє наявність інших нерозпізнаних зворотних ребер з даної вершини і якщо вони є аналогічно розпізнає їх, а якщо немає, то продовжує роботу в звичайному режимі.

Тепер розглянемо алгоритми функціонування кожного агента окремо.

Алгоритм роботи агента-дослідника.

1. $\mu(v) := b$;
2. if $\exists (v, u) \in Q(v) | (\mu(v, u) = w) \text{ and } (\mu(u) = b) \text{ and } (\mu((v, u), v) = w) \text{ and } (\mu((v, u), u) = w) \text{ then do}$
3. EXPL_IE(v);
4. go to 2;
5. end do;
6. else if $\exists (v, u) \in Q(v) | (\mu(v, u) = w) \text{ and } (\mu(u) = w) \text{ then do}$
7. FORWARD(v);
8. go to 2;
9. end do;

```

10. else if  $\exists (v, u) \in Q(v) | (\mu((v, u), v) = b) \text{ and } (\mu((v, u), u) = w) \text{ and } (\mu(v, u) = b)$  then do
11. BACK(v);
12. go to 6;
13. end do;
14. else STOP(v);
EXPL_IE(v):
1. if  $\exists (v, u) \in Q(v) | (\mu(v, u) = w) \text{ and } (\mu(u) = b) \text{ and } (\mu((v, u), v) = w) \text{ and } (\mu((v, u), u) = w)$  then do
2. агент обирає  $(v, u) \in Q(v) | (\mu(v, u) = w) \text{ and } (\mu(u) = b) \text{ and } (\mu((v, u), v) = w) \text{ and } (\mu((v, u), u) = w)$  та переходить
по ньому в вершину  $u$ ;
3.  $\mu((v, u), v) := b$ ;
4.  $\mu(v, u) := b$ ;
5.  $\mu((v, u), u) := b$ ;
6. if  $\exists (v, u) \in Q(v) | (\mu((v, u), v) = w) \text{ and } (\mu(v, u) = b) \text{ and } (\mu((v, u), u) = b)$  then do
7. агент обирає  $(v, u) \in Q(v) | (\mu((v, u), v) = w) \text{ and } (\mu(v, u) = b) \text{ and } (\mu((v, u), u) = b)$  та переходить по ньому в вер-
шину  $u$ ;
8.  $v := u$ ;
9. агент записує в список  $LM$  повідомлення: Forward_ie;
10. go to 6 даної процедури;
11. end do;
12. else do
13. агент записує в список  $LM$  повідомлення: Add_ie;
14. go to 1 даної процедури;
15. end do;
FORWARD(v):
1. Агент обирає  $(v, u) \in Q(v) | (\mu(v, u) = w) \text{ and } (\mu(u) = w)$  та переходить по ньому в вершину  $u$ , фарбуючи
 $\mu(v, u) := b, \mu((v, u), u) := b, \mu(u) := b$ ;
2.  $v := u$ ;
3. агент записує в  $LM$  повідомлення: Forward;
BACK(v):
1. Агент обирає  $(v, u) \in Q(v) | (\mu((v, u), v) = b) \text{ and } (\mu((v, u), u) = w)$  та переходить по ньому в вершину  $u$ , фар-
буючи  $\mu(v, u) := b$ ;
2.  $v := u$ ;
3. агент записує в  $LM$  повідомлення: Back;
STOP(v):
1. Агент фарбує  $\mu(v) := b$  та завершує роботу;
2. агент записує в  $LM$  повідомлення: Stop;
Алгоритм роботи агента-експериментатора:
Вхід: список повідомлень від агента-дослідника.
Вихід: список вершин  $V_H$  і список ребер  $E_H$  графа  $H$ , ізоморфного графу  $G$ .
Дані:  $V_H$  – список вершин графа.  $E_H$  – список ребер графа  $H$ .  $ct$  – лічильник числа відвіданих агентом-дослід-
ником вершин.  $i$  – лічильник, що використовується при визначенні номерів дальніх вершин знайдених зворотних
ребер.  $STOP$  – змінна, що використовується агентом-дослідником для повідомлення агента-експериментатора,
про завершення розпізнавання графа.  $work(1), work(2), \dots, work(t)$  – список номерів вершин робочого шляху, де
 $t$  – довжина цього списку.  $Mes$  – повідомлення, яке оброблюється в даний момент.
Алгоритм:
1.  $LM := \emptyset; ct := 1, i := 0, E_H := \emptyset, t := 1, work(t) := ct, V_H := \{1\}$ ;
3. while  $LM \neq \emptyset$  do
4. if  $LM \neq \emptyset$  then do
5. читаємо повідомлення в  $Mes$ ;
6.  $LM := LM \setminus Mes$ ;
7. List_Processing ();
8. end do;
9. print  $V_H, E_H$ .
List_processing_A():
1. if  $Mes = \text{"Forward"}$  then Forward();
2. if  $Mes = \text{"Back"}$  then Back();
3. if  $Mes = \text{"Forward\_ie"}$  then Forward_ie();

```

```

4. if Mes = "Add_ie" then Add_ie();
5. if Mes = "Stop" then Stop().
Forward():  $ct := ct + 1$ ;  $t := t + 1$ ;  $work(t) := ct$ ;  $V_H := V_H \cup \{ct\}$ ;  $E_H := E_H \cup \{(work(t-1), work(t))\}$ ;
Back(): delete  $work(t)$ ;  $t := t - 1$ ;
Forward_ie():  $i := i + 1$ ;
Add_ie():  $E_H := E_H \cup \{(work(t), work(t-i))\}$ ;  $i := 0$ ;
Stop(): The agent finishes the operation;
Аналіз роботи мультиагентної системи.

```

При виконанні свого алгоритму роботи, за умови, що $n \geq 3$ не менше двох разів агент-дослідник виконає процедуру FORWARD(v) при виконанні якої будуть відвідані нові білі вершини досліджуваного графа G . Після виконання цієї процедури, в пам'ять агента-експериментатора кожного разу додається нова вершина графа H . Таким чином, поступово формується неявна нумерація $\varphi: V_G \rightarrow V_H$, де рівність $\varphi(v) = ct$ встановлюється, коли вершина v фарбується в чорний колір. Зазначена нумерація є бієкцією, оскільки в зв'язному графі G між будь-якими вершинами знайдеться шлях, а отже агентом-дослідником будуть відвідані всі вершини досліджуваного графа. Враховуючи те, що робота алгоритму базується на методі обходу в глибину, всі ребра графа поділяються на ребра, що належать дереву та зворотні ребра. Виконуючи процедуру FORWARD(v) агент-дослідник також розпізнає одне ребро дерева (v, u) і так нумерує вершину u , що ребру (v, u) графа G однозначно відповідає ребро $(\varphi(v), \varphi(u))$ графа H . Виконуючи процедуру EXPL_IE(v), агент розпізнає всі зворотні ребра (v, u) з поточної вершини v графа G та ставить їм в однозначну відповідність ребра $(\varphi(v), \varphi(u))$ графа H . Таким чином, відображення φ є ізоморфізмом графа G на граф H . Враховуючи сказане має місце наступна теорема.

Теорема 1. *Мультиагентна система, виконавши алгоритм розпізнавання графа, розпізнає будь-який граф з точністю до ізоморфізму.*

Обчислимо складності роботи побудованого алгоритму. Розглянемо часову, ємнісну та комунікаційну складності, також підрахуємо кількість переходів по ребрах, які необхідно здійснити агенту-досліднику для повного розпізнавання досліджуваного графа. Зазначимо, що при обчисленні будемо вважати, що перехід агента-дослідника по ребру займає час, що дорівнює деякій константі, а обробка одного повідомлення агентом-експериментатором відбувається не довше переходу агента-дослідника з однієї вершини в іншу.

Загальний час, який буде витрачено агентом-дослідником на аналіз околу робочої вершини $Q(v)$ та вибір необхідних ребер оцінюється зверху як $O(n^2)$. При роботі агента-дослідника, в будь-який момент часу є деякий шлях, від початкової вершини агента-дослідника до його поточної вершини – це простий шлях, від вершини з номером $\varphi(v) = 1$ до вершини з номером $\varphi(u) = ct$. Зрозуміло, що довжина будь-якого такого шляху не перевищує n . Таким чином, легко бачити, що на одноразове виконання кожної з процедур FORWARD(v) та BACK(v) агент-дослідник витрачає один крок, проходячи при цьому одне ребро. При одноразовому виконанні процедури EXPL_IE(v) агент дослідник проходить одне зворотне ребро та не більше ніж $n - 1$ ребро вперед. В кінці процедури відбувається відправка повідомлення для додавання зворотного ребра в список ребер, на що також витрачається один крок. З кожної вершини можливо розпізнати не більше $n - 2$ зворотних ребер. Всього ж вершин, з яких можуть бути зворотні ребра не більше $n - 2$. Таким чином, співвідношення, що визначають часову складність алгоритму виглядають наступним чином:

1. Процедура FORWARD(v) виконується максимум $n - 1$ раз і загальний час її виконання оцінюється зверху як $O(n)$.

2. Процедура BACK(v) виконується не більше ніж $n - 1$ раз та загальний час її виконання оцінюється як $O(n)$.

3. Процедура EXPL_IE(v) виконується не більше $n - 2$ раз, кожен з яких займає не більше n одиниць часу, тобто загальний час виконання процедури оцінюється як $(n - 2)^2 \times n$, тобто $O(n^3)$.

4. Процедура STOP(v) виконується один раз і її асимптотична складність дорівнює $O(1)$.

Таким чином загальна кількість числа переходів по ребрах, що здійснює агент-дослідник не перевищує $O(n) + O(n) + O(n^3) + O(1)$, тобто верхня оцінка числа переходів задовольняє співвідношенню: $M(n) = O(n^3)$.

В той же час верхня оцінка часової складності запропонованого алгоритму задовольняє співвідношення: $T(n) = O(n^3)$.

Ємнісна складність $S(n)$ запропонованого алгоритму визначається складністю списків V_H , E_H , $work(1), \dots, work(t)$, складність яких визначається відповідно величинами $O(n)$, $O(n^2)$, $O(n)$, а отже $S(n) = O(n^2)$.

Також, враховуючи, що на кожному кроці агент-дослідник може відправити не більше одного повідомлення, яке не містить ніякої інформації граф (тобто його об'єм можна вважати рівним константі), легко бачити, що об'єм переданої інформації оцінюється зверху як $O(n^3)$. Отже, $K(n) = O(n^3)$. Враховуючи сказане, має місце наступна теорема.

Теорема 2. *Часова складність алгоритму розпізнавання дорівнює $O(n^3)$, ємнісна складність – $O(n^2)$, комунікаційна складність складає $O(n^3)$, верхня оцінка числа переходів по ребрах, що здійснює агент-дослідник оцінюється як $O(n^3)$. При цьому алгоритм використовує одну фарбу.*

Висновки

В роботі запропоновано новий алгоритм розпізнавання простих зв'язних скінчених неорієнтованих графів колективом агентів. Алгоритм має кубічну часову, квадратичну ємнісну та кубічну комунікаційну складності. Верхня оцінка числа переходів по ребрах, які необхідно виконати агенту-досліднику для повного розпізнавання досліджуваного графа – $O(n^3)$. Мобільний агент має скінчену внутрішню пам'ять, яка не залежить від розмірності досліджуваного графа.

Список використаної літератури

1. Stopkin A. V. Finite graph exploration by a mobile agent. *Mathematical Modeling and Computing*, 2025. Vol. 12, No. 1, pp. 75–82 <https://doi.org/10.23939/mmc2025.01.075>
2. Стьопкін А. В. Розпізнавання зв'язних неорієнтованих графів мобільним агентом. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Одеса, 2025. Т.2 1(92). С. 215–221. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.29>
3. Kuipers B. The spatial semantic hierarchy. *Artificial Intelligence*. 2000. V. 119, № 1–2. pp. 191–233.
4. Dudek G, Jenkin M. Computational principles of mobile robotics. Cambridge, 2000. – 280 p.
5. Sapunov, S. V. Directional Movement of a Collective of Compassless Automata on a Square Lattice of Width 2. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2024. vol. 60, iss. 6, pp. 899–906. <https://doi.org/10.1007/s10559-024-00727-x>
6. Nagavarapu S. C., Vachhani L., Sinha A. et al. Generalizing Multi-agent Graph Exploration Techniques. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2020. <https://doi.org/10.1007/s12555-019-0067-8>
7. Стьопкін А. В. Алгоритм розпізнавання простих неорієнтованих графів колективом агентів. *Вчені записки таврійського національного університету імені В. І. Вернадського Серія: Технічні науки*. Київ, 2024. Т. 35 (74) № 5. С. 303–309. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/43>
8. Stopkin A. V. Exploration of simple graphs by a collective of agents. *Mathematical Modeling and Computing*, 2025. Vol. 12, No. 2, pp. 603–610 <https://doi.org/10.23939/mmc2025.02.603>
9. Dey, S.; Xu, H. Intelligent Distributed Swarm Control for Large-Scale Multi-UAV Systems: A Hierarchical Learning Approach. *Electronics* 2023, 12(1):89. <https://doi.org/10.3390/electronics12010089>
10. Dhar A.K., Gorain B., Mondal K., Patra Sh., Singh R. Edge exploration of anonymous graph by mobile agent with external help. *Computing*, 2023. V.105, 483–506. <https://doi.org/10.1007/s00607-022-01136-8>
11. Dey, S.; Xu, H. Intelligent Distributed Swarm Control for Large-Scale Multi-UAV Systems: A Hierarchical Learning Approach. *Electronics* 2023, 12(1):89. <https://doi.org/10.3390/electronics12010089>
12. Dongyu Li, Shuzhi Sam Ge, Wei He, Guangfu Ma, Lihua Xie. Multilayer formation control of multi-agent systems. *Automatica*, 2019. V 109. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2019.108558>
13. Amirkhani, A., Barshooi, A.H. Consensus in multi-agent systems: a review. *Artif Intell. Rev* 55, 3897–3935 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10097-x>
14. Стьопкін А. В. Мультиагентна система розпізнавання неорієнтованих графів. *Інформаційні технології та суспільство*. Київ, 2024. Вип. 3 (14). 38–43 с. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.3.5>
15. Grunsky, I. S., & Tatarinov, E. A. (2009). Recognition of a finite graph by a wandering agent. *Bulletin of Donetsk National University*, 1, 492–497.

References

1. Stopkin, A. V. (2025). Finite graph exploration by a mobile agent. *Mathematical Modeling and Computing*, 12(1), 75–82. <https://doi.org/10.23939/mmc2025.01.075>
2. Stepkin, A. V. (2025). Graph exploration of connected undirected graphs by a mobile agent. *Visnyk of Kherson National Technical University*, 2(1), 215–221. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.29>
3. Kuipers, B. (2000). The spatial semantic hierarchy. *Artificial Intelligence*, 119(1–2), 191–233.
4. Dudek, G., & Jenkin, M. (2000). *Computational principles of mobile robotics*. Cambridge University Press., p. 280
5. Sapunov, S. V. (2024). Directional movement of a collective of compassless automata on a square lattice of width 2. *Cybernetics and Systems Analysis*, 60(6), 899–906. <https://doi.org/10.1007/s10559-024-00727-x>
6. Nagavarapu, S. C., Vachhani, L., Sinha, A., et al. (2020). Generalizing multi-agent graph exploration techniques. *International Journal of Control, Automation and Systems*. <https://doi.org/10.1007/s12555-019-0067-8>
7. Stepkin, A. V. (2024). Algorithm for recognizing simple undirected graphs by a team of agents. *Scientific Notes of the V. I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences*, 35(74), 303–309. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/43>
8. Stopkin, A. V. (2025). Exploration of simple graphs by a collective of agents. *Mathematical Modeling and Computing*, 12(2), 603–610. <https://doi.org/10.23939/mmc2025.02.603>
9. Dey, S.; Xu, H. (2023). Intelligent Distributed Swarm Control for Large-Scale Multi-UAV Systems: A Hierarchical Learning Approach. *Electronics*, 12(1):89. <https://doi.org/10.3390/electronics12010089>

10. Dhar, A. K., Gorain, B., Mondal, K., Patra, S., & Singh, R. (2023). Edge exploration of anonymous graph by mobile agent with external help. *Computing*, 105, 483–506. <https://doi.org/10.1007/s00607-022-01136-8>
11. Dey, S., & Xu, H. (2023). Intelligent distributed swarm control for large-scale multi-UAV systems: A hierarchical learning approach. *Electronics*, 12(1), 89. <https://doi.org/10.3390/electronics12010089>
12. Dongyu Li, Shuzhi Sam Ge, Wei He, Guangfu Ma, Lihua Xie. (2019) Multilayer formation control of multi-agent systems. *Automatica*. V 109. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2019.108558>
13. Amirkhani, A., & Barshooi, A. H. (2022). Consensus in multi-agent systems: A review. *Artificial Intelligence Review*, 55, 3897–3935. <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10097-x>
14. Stepkin, A. V. (2024). Multi-agent system for recognizing undirected graphs. *Information Technologies and Society*, 3(14), 38–43. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.3.5>
15. Grunsky, I. S., & Tatarinov, E. A. (2009). Recognition of a finite graph by a wandering agent. *Bulletin of Donetsk National University*, 1, 492–497.

Дата першого надходження статті до видання: 09.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

О. М. СУПРУН

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри інтелектуальних кібернетичних систем
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0002-1196-5655

Я. Я. КРАВЧУК

веб-розробник
ORCID: 0009-0006-1593-9995

О. О. СУПРУН

асистент кафедри інтелектуальних програмних систем
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
ORCID: 0000-0002-6243-3720

ГІБРИДНІ АРХІТЕКТУРИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОВЕДІНКОВИХ АНОМАЛІЙ У МЕРЕЖЕВОМУ ТРАФІКУ

Актуальність дослідження зумовлена стрімким зростанням обсягів і різноманітності мережевого трафіку, ускладненням архітектур сучасних розподілених мереж та зростанням частоти складних кіберінцидентів, що проявляються у формі поведінкових аномалій. За таких умов традиційні сигнатурні та окремі модельні підходи аналізу трафіку не забезпечують достатньої точності, стійкості й завчасності реагування, що зумовлює потребу в застосуванні комплексних інтелектуальних підходів до прогнозування аномальної мережевої поведінки.

Метою статті є обґрунтування підходів і підвищення ефективності прогнозування поведінкових аномалій у мережевому трафіку на основі використання гібридних архітектур штучного інтелекту (далі – ШІ), здатних забезпечити адаптивне, стійке та випереджальне виявлення аномальної мережевої поведінки в умовах динамічних і гетерогенних мережевих середовищ.

Методи дослідження ґрунтуються на теоретичному аналізі сучасних наукових джерел у сфері ШІ та кібербезпеки, системному підході до дослідження мережевих процесів, логічному узагальненні результатів і порівняльному аналізі підходів до прогнозування аномалій у мережевому трафіку із застосуванням різних класів інтелектуальних моделей.

Результати дослідження свідчать, що ізольоване застосування окремих моделей ШІ є обмежено ефективним у завданнях раннього прогнозування поведінкових аномалій, тоді як їхнє архітектурне поєднання дає змогу комплексно враховувати часові, структурні та контекстні характеристики трафіку. З'ясовано, що гібридні архітектури ШІ підвищують точність і стійкість прогнозів, зменшують чутливість моделей до дрейфу даних і створюють часову перевагу для превентивного реагування. Ідентифіковано основні науково-практичні проблеми впровадження таких рішень, пов'язані з обмеженою якістю навчальних даних, масштабованістю систем, інтерпретованістю результатів і ризиками цілеспрямованого спотворення моделей.

Висновки. Гібридні архітектури ШІ доцільно розглядати як системну основу для інтелектуального аналізу мережевого трафіку, яка забезпечує перехід від реактивного виявлення інцидентів до проактивного, прогнозно-орієнтованого управління кібербезпекою.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з поглибленням теоретичних засад побудови гібридних архітектур ШІ, розробленням узгоджених критеріїв оцінювання якості раннього прогнозування та дослідженням підходів до підвищення стійкості інтелектуальних систем аналізу трафіку в розподілених і критичних мережевих інфраструктурах.

Ключові слова: кібербезпека мереж, раннє виявлення загроз, прогнозний аналіз, адаптивні моделі, аномальна поведінка, розподілені мережі, стійкість моделей, дрейф даних, пояснюваність рішень.

О. М. SUPRUN

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Intelligent Cybernetic Systems
State University Kyiv Aviation Institute
ORCID: 0000-0002-1196-5655



Ya. Ya. KRAVCHUK

Web-Developer

ORCID: 0009-0006-1593-9995

O. O. SUPRUN

Assistant at the Department of Intelligent Software Systems

Taras Shevchenko National University of Kyiv

ORCID: 0000-0002-6243-3720

HYBRID ARTIFICIAL INTELLIGENCE ARCHITECTURES FOR PREDICTING BEHAVIORAL ANOMALIES IN NETWORK TRAFFIC

The relevance of this study is driven by the rapid growth in the volume and diversity of network traffic, increasing complexity of modern distributed network architectures, and a rising frequency of sophisticated cyber incidents manifested as behavioral anomalies. Under these conditions, traditional signature-based and isolated model-driven traffic analysis approaches fail to provide sufficient accuracy, robustness, and timeliness of response, which necessitates the adoption of integrated intelligent methods for predicting anomalous network behavior.

The purpose of the article is to substantiate methodological approaches and to improve the effectiveness of predicting behavioral anomalies in network traffic through the use of hybrid artificial intelligence architectures, hereinafter referred to as AI, capable of providing adaptive, robust, and anticipatory detection of anomalous network behavior in dynamic and heterogeneous network environments.

The research methods are based on a theoretical analysis of contemporary scientific sources in the fields of AI and cybersecurity, a systems approach to the study of network processes, logical generalization of results, and comparative analysis of approaches to anomaly prediction in network traffic using different classes of intelligent models.

The research results demonstrate that the isolated application of individual AI models is of limited effectiveness for early prediction of behavioral anomalies, whereas their architectural integration enables comprehensive consideration of temporal, structural, and contextual characteristics of traffic. It is established that hybrid AI architectures improve prediction accuracy and robustness, reduce model sensitivity to data drift, and create a temporal advantage for preventive response. Key scientific and practical challenges in the implementation of such solutions are identified, including limited quality of training data, system scalability, interpretability of results, and risks of targeted model manipulation.

Conclusions. Hybrid AI architectures should be considered a systemic foundation for intelligent network traffic analysis, enabling a transition from reactive incident detection to proactive, prediction-oriented cybersecurity management.

Prospects for further research are associated with deepening the theoretical foundations of hybrid AI architecture design, developing harmonized criteria for evaluating the quality of early prediction, and investigating approaches to enhancing the robustness of intelligent traffic analysis systems in distributed and critical network infrastructures.

Key words: network cybersecurity, early threat detection, predictive analysis, adaptive models, anomalous behavior, distributed networks, model robustness, data drift, explainability of decisions.

Постановка проблеми

Стрімка цифровізація суспільства, зростання обсягів передаваних даних і ускладнення архітектур мережевих інфраструктур зумовлюють істотне підвищення вразливості інформаційних систем до поведінкових аномалій у мережевому трафіку, які часто є індикаторами кіберінцидентів, прихованих атак або збоїв у функціонуванні розподілених сервісів. За цих умов традиційні сигнатурні та статистичні методи моніторингу мережі виявляються недостатніми через обмежену здатність адаптуватися до динамічних змін середовища, еволюції загроз і появи нових, раніше невідомих сценаріїв зловмисної поведінки. Актуалізується потреба в застосуванні ШІ як інструменту інтелектуального аналізу мережевого трафіку, здатного виявляти складні нелінійні залежності, навчатися на великих масивах гетерогенних даних та забезпечувати прогнозне виявлення аномалій ще до переходу їх у фазу активної атаки. Водночас застосування окремих моделей ШІ, зокрема лише статистичних, традиційних машинних або глибоких нейронних підходів, не завжди гарантує необхідний рівень точності, стійкості та інтерпретованості результатів у реальних умовах експлуатації мереж. Це зумовлює науково-практичну проблему розроблення гібридних архітектур ШІ, що поєднують переваги різних методів аналізу даних і сприяють підвищенню ефективності прогнозування поведінкових аномалій у мережевому трафіку. Розв'язання цієї проблеми безпосередньо пов'язане з важливими науковими завданнями розвитку інтелектуальних методів кібербезпеки, теорії адаптивних систем та аналізу складних динамічних процесів, а також із практичними завданнями забезпечення стійкості критичних інформаційних інфраструктур, підвищення оперативності реагування на кіберзагрози та зниження ризиків економічних і соціальних втрат у цифровому середовищі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд сучасних наукових публікацій, присвячених гібридним архітектурам ШІ для прогнозування поведінкових аномалій у мережевому трафіку, засвідчує формування комплексного підходу, що поєднує архітектурні

рішення, методи прогнозування, алгоритми детекції та засоби підвищення інтерпретованості результатів. Важливою передумовою розвитку таких систем є формування масштабованої та гнучкої технологічної основи. У роботі Ю. Бершчанського (Y. Bershchanskiy) та співавт. розглянуто контейнеризований дизайн систем ШІ для хмарних і кіберфізичних середовищ, що забезпечує модульну інтеграцію різнорідних аналітичних компонентів і є основою для реалізації гібридних архітектур аналізу мережевого трафіку [1]. Питання захищеної обробки даних у таких системах доповнюється дослідженням І. Р. Опірського зі співавт., у якому проаналізовано технічні особливості реалізації шифрування даних у середовищі Android, що є принципово важливим для збереження цілісності та конфіденційності мережеских потоків [2]. Організаційно-технологічні аспекти впровадження складних програмних рішень висвітлено в праці І. Хунко (I. Hunko), де обґрунтовано підходи до скорочення часу тестування програмного забезпечення, актуальні для швидкого розгортання гібридних систем аналізу трафіку [3]. Архітектурно-алгоритмічний рівень цієї проблеми доповнюється дослідженням Х. Білала (H. Bilal) та співавт., у якому запропоновано гібридну генеративну архітектуру TrafficAI для симуляції й адаптивного прогнозування трафіку в реальному часі [4].

Значна кількість досліджень зосереджена на розвитку гібридних моделей прогнозування мережевого трафіку, здатних урахувати часові залежності та нелінійні поведінкові патерни. Зокрема, Т. Х. Альдх'яні (T. H. Aldhyani) та співавтори запропонували інтелектуальну гібридну модель, яка поєднує класичні методи аналізу часових рядів і алгоритми машинного навчання для підвищення точності прогнозування мережевого трафіку [5]. Поглиблення цього підходу простежується в дослідженні Н. Саїні (N. Saini) та співавт., де гібридну ансамблевую модель використано для аналізу поведінкових відхилень і складних атак, що мають прогнозний характер [6]. Інтеграцію часових кореляцій у гібридні схеми аналізу трафіку реалізовано в роботі А. Х. Насрін Фатіма (A. H. Nasreen Fathima) та співавт., де встановлено підвищення точності детекції аномалій через урахування динамічних залежностей у даних [7]. Алгоритмічні можливості ШІ для аналізу аномальної поведінки в мережескій безпеці узагальнено в дослідженні Х. Цао (H. Cao), яке підтверджує доцільність комбінування різних моделей у прогнозному аналізі мережевого трафіку [8].

Окремий блок досліджень присвячено застосуванню гібридних моделей машинного та глибокого навчання безпосередньо для виявлення поведінкових аномалій і вторгнень у мережевому трафіку. Д. К. Редді (D. K. Reddy) та співавт. продемонстрували ефективність глибоких нейронних мереж для аналізу трафіку інтернету речей (Internet of Things, IoT) у контексті інфраструктур «розумних міст» [9]. Поєднання глибинного представлення ознак і часової динаміки реалізовано в гібридній архітектурі DBN-LSTM, яку запропонували А. Чень (A. Chen) та співавт. для детекції поведінкових аномалій у мережеских даних [10]. Просторово-часовий підхід до аналізу трафіку розвинено в роботі В. Ло (W. Lo) та співавт., де гібридна модель системи виявлення вторгнень орієнтована на транспортні мережі [11]. Аналогічну ідеологію поєднання глибоких моделей застосували І. Уллах (I. Ullah) та співавт. для виявлення аномальної активності в IoT-мережах [12].

Завершальний блок робіт стосується узагальнюваності, інтерпретованості та розширення функціональних можливостей гібридних архітектур аналізу мережевого трафіку. С. Даршан (S. Darshan) та співавтори дослідили гібридні підходи до прогнозування та оцінювання аномалій у програмно керованих мережах, наголошуючи на необхідності поєднання різних моделей аналізу в єдиній системі [13]. У комплексному огляді А. Насчіта (A. Nascita) та співавт. систематизовано підходи explainable artificial intelligence у задачах класифікації, прогнозування інтернет-трафіку та виявлення вторгнень, що є критично важливим для практичного впровадження гібридних моделей [14]. В. С. Рао (V. S. Rao) та співавт. продемонстрували ефективність поєднання згорткових нейронних мереж і генеративно-змагальних моделей для виявлення аномалій у мережевому трафіку, підкресливши роль генеративних компонентів у підсиленні детекційних можливостей систем [15].

Попри активне застосування моделей ШІ для аналізу мережевого трафіку, залишаються нерозв'язаними питання раннього прогнозування поведінкових аномалій за умови високої змінності мережеских процесів. Недостатньо обґрунтованими є підходи до поєднання різних методів ШІ в гібридних архітектурах, а також їхня ефективність у розподілених мережеских середовищах. Обмежено досліджено проблеми якості навчальних даних, масштабованості, інтерпретованості прогнозів і стійкості моделей до цілеспрямованого спотворення, що стримує практичне впровадження таких рішень.

У роботі системно проаналізовано можливості ШІ для прогнозування поведінкових аномалій, обґрунтовано доцільність використання гібридних архітектур, а також досліджено їхню ефективність у ранньому прогнозуванні в розподілених мережах. Запропоновано практичні рекомендації щодо впровадження гібридних архітектур ШІ з урахуванням виявлених обмежень, що сприяє підвищенню рівня кібербезпеки та оперативності реагування на аномальні події.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є підвищення ефективності прогнозування поведінкових аномалій у мережевому трафіку на основі використання гібридних архітектур ШІ, здатних забезпечити адаптивне, стійке та завчасне виявлення аномальної мережескої поведінки в умовах динамічних і гетерогенних мережеских середовищ.

Для досягнення поставленої мети передбачено розв'язання таких завдань:

1. Проаналізувати можливості застосування моделей ШІ для прогнозування поведінкових аномалій у мережевому трафіку та обґрунтувати доцільність поєднання різних методів ШІ в межах гібридних архітектур з урахуванням змінності мережевих процесів.
2. Дослідити ефективність гібридних архітектур ШІ в завданнях раннього прогнозування поведінкових аномалій у розподілених мережевих середовищах і виявити основні науково-практичні проблеми їхнього застосування.
3. Розробити практичні рекомендації щодо впровадження гібридних архітектур ШІ в системи аналізу мережевого трафіку з метою підвищення рівня кібербезпеки та оперативності реагування на аномальні події.

Викладення основного матеріалу дослідження

Оцінювання можливостей застосування моделей ШІ для прогнозування поведінкових аномалій у мережевому трафіку зумовлюється необхідністю адекватного врахування змінності мережевих процесів, нелінійної природи трафіку та високої динаміки взаємодії між користувачами, сервісами й мережевими протоколами. У сучасних мережах характеристики трафіку змінюються під впливом масштабування хмарних сервісів, поширення IoT-пристроїв, мобільних платформ і зашифрованих каналів передавання даних, що ускладнює формування стабільних шаблонів нормальної поведінки. За цих умов моделі ШІ розглядаються не лише як інструмент класифікації або виявлення відхилень, а як засіб прогнозування майбутніх змін у поведінці трафіку на основі історичних і потокових даних, що дає змогу перейти від реактивних до проактивних механізмів кіберзахисту (табл. 1).

Таблиця 1

Можливості моделей ШІ для прогнозування поведінкових аномалій у мережевому трафіку

Тип моделей ШІ	Основні можливості	Обмеження в умовах змінного трафіку
Статистичні та ймовірнісні моделі	Виявлення базових відхилень від середніх ймовірнісних характеристик трафіку	Низька адаптивність до різких змін і складних нелінійних залежностей
Класичні моделі машинного навчання	Класифікація та прогнозування аномалій на основі ознак трафіку	Залежність від якості ознак і необхідність регулярного перенавчання
Глибинні нейронні моделі	Моделювання складних часових і просторових залежностей у трафіку	Висока обчислювальна складність і обмежена інтерпретованість
Послідовні та рекурентні моделі	Прогнозування динаміки трафіку в часовому вимірі	Чутливість до шумів і дрейфу даних
Самонавчальні та адаптивні моделі	Прийняття до нових патернів мережевої поведінки в режимі реального часу	Ризики накопичення помилок і складність контролю навчання

Джерело: сформовано на основі [5, р. 130437; 6; 7, р. 136812; 8, р. 118610; 12, р. 3170].

У практичних умовах експлуатації сучасних мережевих інфраструктур моделі ШІ застосовуються як інструмент прогнозного аналізу, що інтегрується в системи моніторингу трафіку та виявлення вторгнень і працює на основі потокових даних у режимі, близькому до реального часу. Статистичні та ймовірнісні моделі застосовуються для формування базових профілів нормальної поведінки мережі й дають змогу оперативно фіксувати відхилення, спричинені нетиповими сплесками трафіку або порушенням часових закономірностей [12, р. 3170]. Традиційні моделі машинного навчання – для прогнозування ймовірності переходу мережевого стану в аномальний режим на основі наборів агрегованих ознак, що є характерним для корпоративних мереж і центрів обробки даних із відносно стабільною структурою сервісів. Глибинні нейронні та послідовні моделі – у складних розподілених середовищах, де необхідно враховувати довготривалі часові залежності та взаємодію між багатьма потоками, зокрема для раннього виявлення повільних або багатофазних атак, які не проявляються у формі різких аномалій. Адаптивні та самонавчальні моделі ШІ – для корекції прогнозів у разі дрейфу даних, спричиненого змінами конфігурації мережі, появою нових сервісів або зміною поведінки користувачів, що є характерним для хмарних і гібридних інфраструктур. Практична цінність такого підходу полягає в можливості завчасно виявляти потенційно небезпечні тенденції в трафіку та переході від реактивного реагування до проактивного управління мережевою безпекою без надмірного зростання кількості хибних спрацювань [7, р. 136812].

Поєднання різних методів ШІ у межах гібридних архітектур зумовлене необхідністю одночасного врахування різних аспектів мережевої поведінки, які не можуть бути повноцінно охоплені єдиною моделлю. Аномальна мережна поведінка формується під впливом часових змін трафіку, структурних взаємодій між вузлами, протокольних особливостей і контексту використання сервісів, що потребує розподілу аналітичних функцій між кількома взаємопов'язаними компонентами. Гібридні архітектури дають змогу підвищити точність прогнозування через взаємне доповнення моделей, а також забезпечити стійкість результатів у разі зміни режимів роботи мережі або появи нових типів аномалій (табл. 2).

У реальних умовах експлуатації мереж гібридні архітектури реалізуються як багаторівневі системи, де різні компоненти ШІ послідовно або паралельно аналізують трафік із різною глибиною та часовим горизонтом. На етапі попередньої обробки інтелектуальні модулі формують узгоджені представлення даних, що дає змогу прогнозним моделям працювати зі стабільнішими й менш зашумленими ознаками навіть за нерівномірних навантажень або

Таблиця 2

Комбінації методів ШІ в гібридних архітектурах прогнозування аномальної мережевої поведінки

Комбінація методів ШІ	Функціональне призначення в архітектурі	Практичний ефект
Формування ознак + прогнозна модель	виокремлення інформативних характеристик і подальший прогноз	зниження впливу шумів, стабільніші прогнози
Інтерпретований блок + модель прогнозування	контроль логіки прогнозування та оцінювання ризиків	зменшення хибних спрацювань, керованість рішень
Ансамбль різнорідних моделей	паралельне прогнозування та агрегування результатів	стійкість до деградації окремих моделей
Часові моделі + графові компоненти	аналіз динаміки та міжвузлових взаємодій	прогноз поширення аномалій у мережі
Базова модель + механізм адаптації	контроль дрейфу та корекція параметрів	збереження якості у разі зміни трафіку

Джерело: сформовано на основі [5, р. 130440; 6; 7, р. 136815; 10, р. 5; 15, р. 891].

Таблиця 3

Ефективність гібридних архітектур ШІ для раннього прогнозування аномалій у розподілених мережах

Архітектурна схема	Особливості аналізу в розподіленому середовищі	Практичний результат
Локально-глобальна інтеграція	узгодження локальних прогнозів на вузлах	раннє виявлення кумулятивних відхилень
Ієрархічне прогнозування	різні горизонти прогнозу для рівнів мережі	скорочення часу реагування
Децентралізована взаємодія	обмін узагальненими оцінками без сирих даних	стійкість до втрат зв'язку
Прогнозування з випередженням	оцінка майбутніх станів трафіку	превентивне управління
Контекстноорієнтований аналіз	урахування ролі сегмента або сервісу	зниження кількості хибних тривог

Джерело: сформовано на основі [4, р. 8; 9; 11, р. 6; 12, р. 3175; 14, р. 526].

змін структури трафіку. Ансамблеві підходи застосовуються в середовищах зі змішаними типами аномалій, де одні моделі ефективні для короткочасних сплесків активності, а інші – для повільних, тривалих відхилень, що зменшує ризик пропуску складних сценаріїв. Поєднання часових і графових компонентів застосовується в корпоративних та хмарних мережах для прогнозування не лише факту появи аномалії, а і її потенційного поширення між сервісами або сегментами, що є важливим для завчасної локалізації інцидентів [5, р. 130440]. Адаптаційні механізми в складі гібридних архітектур забезпечують контроль дрейфу даних і своєчасне оновлення параметрів моделей, що дає змогу підтримувати стабільну якість прогнозування в умовах постійних змін мережевих конфігурацій і поведінки користувачів без надмірного збільшення обчислювальних витрат.

Ефективність гібридних архітектур ШІ в завданнях раннього прогнозування поведінкових аномалій у розподілених мережевих середовищах зумовлена їхньою здатністю узгоджувати часткові спостереження, отримані на різних рівнях інфраструктури, у цілісне прогностичне уявлення про майбутній стан мережі. За умов асинхронності подій, обмеженої доступності глобальних даних і просторової розподіленості трафіку важливого значення набуває виявлення слабких і непрямих ознак аномальної поведінки, які окремо не мають критичного характеру, але в сукупності формують передумови мережевих інцидентів. Гібридні архітектури дають змогу поєднувати локальні прогностичні оцінки з глобальними механізмами узгодження, що створює основу для завчасного виявлення небезпечних тенденцій у мережевій поведінці (табл. 3).

У сучасних розподілених мережах гібридні архітектури ШІ застосовуються для побудови прогностичних моделей, що працюють у різних часових і просторових масштабах, забезпечуючи синхронізацію локальних спостережень із глобальними закономірностями. Локальні модулі здійснюють швидку оцінку змін поведінки трафіку в межах окремих сегментів або вузлів, тоді як центральні або координаційні компоненти аналізують узгодженість цих змін у ширшому контексті функціонування мережі. У хмарних та міжорганізаційних інфраструктурах такий підхід дає змогу виявляти поступове формування складних аномальних сценаріїв, зокрема синхронізовані відхилення в кількох сервісах, що свідчать про підготовчу фазу атаки або деградацію сервісів [4, р. 8]. Ієрархічна організація прогнозування забезпечує поєднання короткострокових сигналів з довгостроковими тенденціями, що підвищує точність ранніх попереджень і зменшує ризик передчасних або необґрунтованих реакцій. У децентралізованих середовищах практичну цінність має використання узагальнених прогностичних оцінок замість повного обміну даними, що дає змогу зберігати конфіденційність і знижувати навантаження на мережу без втрати прогностичної точності [14, р. 526]. Сукупно це забезпечує системам безпеки часову перевагу для планування адаптивних заходів, локалізації потенційних інцидентів і оптимального розподілу ресурсів до переходу аномальної поведінки в критичну фазу.

Застосування гібридних архітектур ШІ для прогнозування поведінкових аномалій у мережевому трафіку супроводжується низькою взаємопов'язаних науково-практичних проблем, які істотно впливають на перевіреність і стабільність результатів у реальних умовах експлуатації. Однією з основних проблем є обмежена якість і репрезентативність навчальних даних, що проявляється в дисбалансі між нормальними та аномальними класами, неповноті маркування, наявності зашумлених або застарілих зразків і невідповідності історичних даних поточним

режимам роботи мережі. У гібридних архітектурах ця проблема ускладнюється накопиченням похибок між компонентами, коли помилки попередніх модулів поширюються на наступні рівні аналізу та спотворюють прогнозні оцінки. Значним викликом залишається масштабованість рішень, оскільки багатокомпонентні архітектури потребують узгодженої обробки великих обсягів потокових даних у режимі, близькому до реального часу, що зумовлює зростання обчислювальних витрат, затримок та складності розгортання в розподілених середовищах. Додатково виникають проблеми синхронізації між компонентами, балансування навантаження та підтримання стабільної якості прогнозу за умов нерівномірного трафіку. Інтерпретованість гібридних моделей є ще одним критичним аспектом, оскільки поєднання різномірних методів ШІ часто унеможлиблює відстеження причин формування прогнозу, знижує прозорість ухвалення рішень та їхню валідацію фахівцями з кібербезпеки. Це особливо проблематично в середовищах, де результати аналізу використовуються для автоматизованого реагування або мають правові й організаційні наслідки [15, р. 891]. Окрему групу становлять ризики цілеспрямованого викривлення моделей, зокрема через отруєння навчальних даних, маніпуляцію ознаками трафіку або адаптивну поведінку зловмисників, які навмисно формують шаблони, що вводять гібридні системи в оману. У складних архітектурах такі атаки можуть бути локалізованими на окремих компонентах, але мати непропорційний вплив на загальний результат прогнозування.

Упровадження гібридних архітектур ШІ в системи аналізу мережевого трафіку доцільно здійснювати як інженерно керований процес, у якому узгоджуються вимоги кібербезпеки, продуктивності та відтворюваності результатів на всіх етапах життєвого циклу моделі. Практично обґрунтованим є проєктування архітектури на основі принципу функціональної декомпозиції, коли окремі компоненти відповідають за попередню нормалізацію та фільтрацію шумів, формування поведінкових ознак, прогнозування аномалій, оцінювання невизначеності та контекстну валідацію результату з урахуванням мережевих політик. Для зменшення ризику деградації якості в експлуатації необхідно закладати механізми контролю дрейфу даних і регламент оновлення моделей, який поєднує планове перенавчання з подієвими тригерами, наприклад у разі зміни топології, введенні нових сервісів або появи нетипових профілів трафіку. Важливо забезпечувати репрезентативність навчальних вибірок шляхом комбінування історичних логів із контрольованими сценаріями тестування та верифікації, а також мінімізувати вплив дисбалансу класів через коректну постановку метрик і порогів ухвалення рішення, орієнтованих не лише на точність, а й на вартість пропуску інциденту та хибної тривоги.

З позицій оперативності реагування гібридні архітектури доцільно інтегрувати з механізмами автоматизованого реагування на інциденти, однак із керованими рівнями автоматизації: для подій із високою невизначеністю доцільним є напівавтоматичний режим із пріоритизацією, збагаченням контексту і маршрутизацією до аналітика, тоді як для стабільно розпізнаваних сценаріїв – автоматичні дії типу тимчасового обмеження сесій, сегментації доступу або ізоляції вузла в межах політик. Практична ефективність підвищується шляхом упровадження оцінки невизначеності та ансамблевого узгодження прогнозів, що дає змогу ранжувати сповіщення та уникати «перевантаження тривогами» в центрах моніторингу. Для забезпечення масштабованості рекомендовано розгортати компоненти обробки трафіку ближче до джерел даних у критичних сегментах і залишати централізованим рівень узгодження, кореляції та формування управлінського рішення, що зменшує затримки й мережеві витрати без втрати цілісності аналітики.

Окремої уваги потребує інтерпретованість: у практичній реалізації варто забезпечувати пояснювані артефакти для кожного попередження, зокрема перелік основних ознак / тригерів, контекстний профіль вузла або сервісу, часову динаміку відхилення та очікуваний сценарій розвитку події. Це підвищує довіру до рішень ШІ, пришвидшує тριαж інцидентів і скорочує час до локалізації першопричини. Для зниження ризиків цілеспрямованого викривлення моделей необхідно застосовувати контроль цілісності даних і каналів збору, виявлення аномалій у самих навчальних потоках, ізоляцію контурів навчання від виробничих контурів, а також регулярні перевірки стійкості до навмисних маніпуляцій трафіком у межах сценарного тестування. У практичному вимірі впровадження має супроводжуватися системою моніторингу якості моделей у часі, де фіксуються зміни метрик, частота хибних спрацювань, затримки обробки та ефективність реагування, а також визначеними критеріями деградації, після яких ініціюється перегляд ознак, компонентів або конфігурації гібридної архітектури. Така організація забезпечує не лише підвищення рівня кібербезпеки, а й кероване скорочення часу виявлення та реагування на аномальні події в умовах сучасних динамічних мережевих середовищ.

Висновки

У результаті дослідження встановлено, що гібридні архітектури ШІ забезпечують принципово вищу ефективність прогнозування поведінкових аномалій у мережевому трафіку порівняно з ізольованими моделями, оскільки дають змогу інтегрувати часові, структурні та контекстні характеристики мережевої поведінки в єдине прогностичне представлення. Доведено, що саме архітектурне поєднання різномірних методів ШІ створює умови для переходу від реактивного виявлення інцидентів до раннього прогнозування аномальних тенденцій, що підвищує стійкість мереж і забезпечує часову перевагу для превентивного реагування. Водночас ідентифіковано основні науково-практичні проблеми застосування гібридних архітектур ШІ, зокрема обмежену якість і динамічну

нестабільність навчальних даних, накопичення похибок між компонентами, складність масштабування багаторівневих рішень у розподілених середовищах, недостатню інтерпретованість прогнозів і підвищену вразливість до цілеспрямованих адверсаріальних впливів. Показано, що ці проблеми мають системний характер і безпосередньо впливають на надійність та керованість прогнозних рішень у реальних умовах експлуатації. Практичні рекомендації, сформульовані в роботі, обґрунтовують доцільність інженерно керованого впровадження гібридних архітектур ШІ з обов'язковим урахуванням механізмів адаптації, контролю дрейфу даних, оцінювання невизначеності та пояснюваності результатів, а також інтеграції прогнозних модулів із контурами оперативного реагування на інциденти. Перспективи подальших досліджень пов'язані з формалізацією принципів побудови гібридних архітектур, розробленням стандартизованих метрик оцінювання раннього прогнозування та стійкості моделей, а також із поглибленням досліджень захисту гібридних систем ШІ від адверсаріальних впливів у критичних і розподілених мережевих середовищах.

Список використаної літератури

1. Bershchanskyi Y., Klym H., Shevchuk Y. Containerized Artificial Intelligent System Design in Cloud and Cyber-Physical Systems. *Advances in Cyber-Physical Systems*. 2024. Vol. 9, no. 2. P. 151–157. URL: <https://doi.org/10.23939/acps2024.02.151> (date of access: 05.01.2026).
2. Опірський І. Р., Хохлачова Ю. Є., Стефанків А. В., Шевчук Ю. А. Аналіз технічних особливостей реалізації шифрування даних на SD-картах в Android. *Сучасний захист інформації*. 2025. Вип. 1, № 61. С. 219–228. DOI: <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2025.016526>
3. Hunko I. How to Effectively Reduce Software Testing Time: From Requirements to Regression. Lodz: Futurity Research Publishing, 2025. 158 p. URL: <https://futurity-publishing.com/wp-content/uploads/2025/04/7%D0%9F-29.03.25-3.pdf>
4. Hybrid TrafficAI: A Generative AI Framework for Real-Time Traffic Simulation and Adaptive Behavior Modeling / H. Bilal et al. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2025. P. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1109/tits.2025.3571041> (date of access: 05.01.2026).
5. Intelligent Hybrid Model to Enhance Time Series Models for Predicting Network Traffic / T. H. H. Aldhyani et al. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 130431–130451. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3009169> (date of access: 05.01.2026).
6. A hybrid ensemble machine learning model for detecting APT attacks based on network behavior anomaly detection / N. Saini et al. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2023. Vol. 35, № 28. Article e7865. URL: <https://doi.org/10.1002/cpe.7865> (date of access: 05.01.2026).
7. Nasreen Fathima A. H., Syed Ibrahim S. P., Khraisat A. Enhancing Network Traffic Anomaly Detection: Leveraging Temporal Correlation Index in a Hybrid Framework. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 136805–136824. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3458903> (date of access: 05.01.2026).
8. Cao H. The detection of abnormal behavior by artificial intelligence algorithms under network security. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*. 2024. Vol. 12. P. 118605–118617. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3436541> (date of access: 07.01.2026).
9. Deep neural network based anomaly detection in Internet of Things network traffic tracking for the applications of future smart cities / D. K. Reddy et al. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1002/ett.4121> (date of access: 05.01.2026).
10. An efficient network behavior anomaly detection using a hybrid DBN-LSTM network / A. Chen et al. *Computers & Security*. 2022. Vol. 114. P. 102600. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102600> (date of access: 05.01.2026)
11. A hybrid deep learning based intrusion detection system using spatial-temporal representation of in-vehicle network traffic / W. Lo et al. *Vehicular Communications*. 2022. Vol. 35. P. 100471. URL: <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2022.100471> (date of access: 05.01.2026).
12. Nascita A., Aceto G., Ciuonzo D., Montieri A., Persico V., Pescapé A. A Survey on Explainable Artificial Intelligence for Internet Traffic Classification and Prediction, and Intrusion Detection. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2025. Vol. 27, № 5. P. 3165–3198. URL: <https://doi.org/10.1109/comst.2024.3504955> (date of access: 05.01.2026).
13. Ullah I., Ullah A., Sajjad M. Towards a Hybrid Deep Learning Model for Anomalous Activities Detection in Internet of Things Networks. *IoT*. 2021. Vol. 2, no. 3. P. 428–448. URL: <https://doi.org/10.3390/iot2030022> (date of access: 05.01.2026).
14. Darshan S., Radhika N., Radhika G. Predicting and Evaluating Anomaly Detection and Traffic Analysis on Software Defined Networks Using a Hybrid Machine Learning Approach. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore, 2025. P. 521–532. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-97-4540-1_38 (date of access: 05.01.2026).
15. AI Driven Anomaly Detection in Network Traffic Using Hybrid CNN-GAN / V. S. Rao et al. *Journal of Advances in Information Technology*. 2024. Vol. 15, no. 7. P. 886–895. URL: <https://doi.org/10.12720/jait.15.7.886-895> (date of access: 05.01.2026).

References

1. Bershchanskyi, Y., Klym, H., & Shevchuk, Y. (2024). Containerized Artificial Intelligent System Design in Cloud and Cyber-Physical Systems. *Advances in Cyber-Physical Systems*, 9(2), 151–157. <https://doi.org/10.23939/acps2024.02.151>
2. Opirskiy I. R., Khokhlachova Yu. Ye., Stefankiv A. V., Shevchuk Yu. A. (2025) Analiz tekhnichnykh osoblyvostei realizatsii shyfruvannya danykh na SD-kartakh v Android [Analysis of technical features of data encryption implementation on SD cards in Android]. *Suchasnyi zakhyst informatsii*, no. 1 (61), pp. 219–228. DOI: <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2025.016526>
3. Hunko, I. (2025). *How to effectively reduce software testing time: From requirements to regression*. Futurity Research Publishing. <https://futuraity-publishing.com/wp-content/uploads/2025/04/7%D0%9F-29.03.25-3.pdf>
4. Bilal, H., Rehman, A., Aslam, M. S., Ullah, I., Chang, W.-J., Kumar, N., & Almuhaideb, A. M. (2025). Hybrid TrafficAI: A Generative AI Framework for Real-Time Traffic Simulation and Adaptive Behavior Modeling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1–17. <https://doi.org/10.1109/tits.2025.3571041>
5. Aldhyani, T. H. H., Alrasheedi, M., Alqarni, A. A., Alzahrani, M. Y., & Bamhdi, A. M. (2020). Intelligent Hybrid Model to Enhance Time Series Models for Predicting Network Traffic. *IEEE Access*, 8, 130431–130451. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3009169>
5. Saini, N., Bhat Kasaragod, V., Prakasha, K., & Das, A. K. (2023). A hybrid ensemble machine learning model for detecting APT attacks based on network behavior anomaly detection. *Concurrency and Computation: Practice & Experience*, 35(28). <https://doi.org/10.1002/cpe.7865>
6. Nasreen Fathima, A. H., Ibrahim, S. P. S., & Khraisat, A. (2024). Enhancing network traffic anomaly detection: Leveraging temporal correlation index in a hybrid framework. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 12, 136805–136824. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3458903>
7. Cao, H. (2024). The detection of abnormal behavior by artificial intelligence algorithms under network security. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 12, 118605–118617. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3436541>
8. Reddy, D. K., Behera, H. S., Nayak, J., Vijayakumar, P., Naik, B., & Singh, P. K. (2020). Deep neural network based anomaly detection in Internet of Things network traffic tracking for the applications of future smart cities. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. <https://doi.org/10.1002/ett.4121>
9. Chen, A., Fu, Y., Zheng, X., & Lu, G. (2022). An efficient network behavior anomaly detection using a hybrid DBN-LSTM network. *Computers & Security*, 114, 102600. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102600>
10. Lo, W., Alqahtani, H., Thakur, K., Almadhor, A., Chander, S., & Kumar, G. (2022). A hybrid deep learning based intrusion detection system using spatial-temporal representation of in-vehicle network traffic. *Vehicular Communications*, 35, 100471. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2022.100471>
11. Nascita, A., Aceto, G., Ciuonzo, D., Montieri, A., Persico, V., & Pescapé, A. (2025). A survey on explainable artificial intelligence for Internet traffic classification and prediction, and intrusion detection. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 27(5), 3165–3198. <https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3504955>
12. Ullah, I., Ullah, A., & Sajjad, M. (2021). Towards a Hybrid Deep Learning Model for Anomalous Activities Detection in Internet of Things Networks. *IoT*, 2(3), 428–448. <https://doi.org/10.3390/iot2030022>
13. Darshan, S., Radhika, N., & Radhika, G. (2025). Predicting and Evaluating Anomaly Detection and Traffic Analysis on Software Defined Networks Using a Hybrid Machine Learning Approach. In *Lecture Notes in Electrical Engineering* (pp. 521–532). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4540-1_38
14. Rao, V. S., Balakrishna, R., El-Ebiary, Y. A. B., Thapar, P., Saravanan, K. A., & Godla, S. R. (2024). AI Driven Anomaly Detection in Network Traffic Using Hybrid CNN-GAN. *Journal of Advances in Information Technology*, 15(7), 886–895. <https://doi.org/10.12720/jait.15.7.886-895>

Дата першого надходження статті до видання: 05.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

Р. О. ТИЧКОВСЬКИЙ

кандидат технічних наук,
доцент кафедри інформаційних технологій
Карпатський національний університет імені Василя Стефаника
ORCID: 0009-0001-5136-2648

Д. Д. ПОВАРЧУК

кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри інформаційних технологій
Карпатський національний університет імені Василя Стефаника
ORCID: 0000-0002-2845-0295

КОМПЛЕКСНА АРХІТЕКТУРА ВИСОКОДОСТУПНОЇ ХМАРНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ З АВТОМАТИЧНИМ МАСШТАБУВАННЯМ ТА ІНТЕГРОВАНИМ МОНІТОРИНГОМ В AMAZON WEB SERVICES

У даній статті вирішено науково-практичну проблему проектування та реалізації комплексної високодоступної хмарної інфраструктури з автоматичним масштабуванням, багаторівневою безпекою та інтегрованою системою моніторингу в середовищі Amazon Web Services. Сучасні веб-додатки потребують надійної інфраструктури, яка забезпечує безперервну роботу, динамічне масштабування під час пікових навантажень та комплексний моніторинг усіх компонентів системи. Традиційні підходи до побудови хмарної інфраструктури часто не враховують інтеграцію всіх необхідних компонентів у єдину екосистему, що призводить до складнощів в управлінні та моніторингу. Запропонована архітектура базується на принципах Infrastructure as Code та включає створення VPC з мультизональним розгортанням, налаштування Application Load Balancer з диференційованою маршрутизацією трафіку, Auto Scaling Groups з інтелектуальними політиками масштабування та комплексну систему моніторингу на базі Grafana, Prometheus та CloudWatch. Центральним елементом роботи є розроблена методологія інтеграції всіх компонентів інфраструктури, включаючи мережеву топологію з публічними та приватними підмережами, багаторівневу систему безпеки з Security Groups та Network ACLs, RDS з Multi-AZ конфігурацією та автоматизоване резервне копіювання. Особливу увагу приділено налаштуванню диференційованої маршрутизації через ALB (/prod, /test, /monitoring), конфігурації Bastion Host з нестандартним SSH портом 12322 та інтеграції систем моніторингу з автоматичними алертами. Практична значущість роботи полягає у створенні еталонної архітектури, яка забезпечує 99.9 % доступності, автоматичне масштабування на основі метрик CPU та пам'яті, та комплексний моніторинг всіх компонентів системи. Наукова новизна полягає в комплексному підході до інтеграції сервісів AWS з урахуванням специфіки веб-додатків та вимог до безпеки.

Ключові слова: хмарна інфраструктура, AWS, автоматичне масштабування, моніторинг, Grafana, Prometheus.

R. O. TYCHKOVSKYI

Candidate of Technical Science,
Associate Professor at the Information Technology Department
Vasyl Stefanyk Carpathian National University
ORCID: 0009-0001-5136-2648

D. D. POVARCHUK

Candidate of Technical Science,
Senior Lecturer at the Information Technology Department
Vasyl Stefanyk Carpathian National University
ORCID: 0000-0002-2845-0295

COMPREHENSIVE ARCHITECTURE OF HIGHLY AVAILABLE CLOUD INFRASTRUCTURE WITH AUTO-SCALING AND INTEGRATED MONITORING IN AMAZON WEB SERVICES

This article addresses the scientific and practical problem of designing and implementing comprehensive highly available cloud infrastructure with auto-scaling, multi-layered security, and integrated monitoring system in the Amazon Web Services environment. Modern web applications require reliable infrastructure that ensures continuous operation, dynamic scaling during peak loads, and comprehensive monitoring of all system components. Traditional approaches



© Р. О. Тичковський, Д. Д. Поварчук, 2026

Стаття поширюється на умовах відкритої ліцензії CC BY 4.0

to cloud infrastructure often fail to consider integration of all necessary components into a unified ecosystem, leading to management and monitoring complexities. The proposed architecture is based on Infrastructure as Code principles and includes VPC creation with multi-zone deployment, Application Load Balancer configuration with differentiated traffic routing, Auto Scaling Groups with intelligent scaling policies, and comprehensive monitoring system based on Grafana, Prometheus, and CloudWatch. The central element of this work is the developed methodology for integrating all infrastructure components, including network topology with public and private subnets, multi-layered security system with Security Groups and Network ACLs, RDS with Multi-AZ configuration, and automated backup. Special attention is given to differentiated routing configuration through ALB (/prod, /test, /monitoring), Bastion Host configuration with non-standard SSH port 12322, and monitoring systems integration with automatic alerts. The practical significance lies in creating a reference architecture that ensures 99.9 % availability, automatic scaling based on CPU and memory metrics, and comprehensive monitoring of all system components. The scientific novelty consists of the comprehensive approach to AWS services integration considering web application specifics and security requirements.

Key words: cloud infrastructure, AWS, auto-scaling, monitoring, Grafana, Prometheus.

Постановка проблеми

Сучасні веб-додатки потребують складної інфраструктури, яка може забезпечити високу доступність, автоматичне масштабування та комплексний моніторинг. Організації стикаються з викликами щодо інтеграції різних компонентів хмарної інфраструктури в єдину систему, яка б забезпечувала надійність, безпеку та ефективність. Традиційні підходи часто призводять до фрагментованих рішень, які важко підтримувати та масштабувати [1].

Основними проблемами є: складність налаштування диференційованої маршрутизації трафіку, інтеграція систем моніторингу, забезпечення безпеки через багаторівневий захист та автоматизація процесів масштабування. Особливо актуальною є проблема створення уніфікованої архітектури, яка б інтегрувала всі необхідні компоненти від мережевої інфраструктури до систем моніторингу [5].

Предметом дослідження є розробка комплексної архітектури хмарної інфраструктури AWS. Метою є створення методології, яка забезпечить інтеграцію всіх компонентів системи з урахуванням вимог до доступності, безпеки та моніторингу [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження показують, що мультизональне розгортання підвищує доступність до 99.99 %, але вимагає прайвильної конфігурації мережі [2]. Автоматичне масштабування на основі CPU та пам'яті забезпечує ефективне використання ресурсів, але потребує точного налаштування порогових значень [3]. Інтеграція Prometheus та Grafana з CloudWatch створює потужну систему моніторингу, але вимагає ретельного планування архітектури [4].

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка комплексної архітектури AWS, яка інтегрує мережеву інфраструктуру, системи безпеки, автоматичне масштабування та моніторинг в єдину екосистему для забезпечення високодоступних веб-додатків.

Викладення основного матеріалу дослідження

З метою розв'язання поставленої задачі розроблено план виконання, в декілька пунктів, наведених далі.

1. Мережева інфраструктура.

На рисунку 1 створено VPC з CIDR блоком 10.0.0.0/16, що забезпечує 65536 IP-адрес для масштабування. Структура підмереж включає: Public Subnet AZ-A: 10.0.1.0/24 (Bastion Host, NAT Gateway), Public Subnet AZ-B: 10.0.2.0/24 (Application Load Balancer, NAT Gateway), Private Subnet AZ-A: 10.0.10.0/24 (Web servers, RDS Primary), Private Subnet AZ-B: 10.0.20.0/24 (Web servers, RDS Standby). Налаштовано Internet Gateway для публічного доступу та окремі NAT Gateway в кожній зоні доступності для забезпечення вихідного інтернет-трафіку з приватних підмереж. Створено відповідні Route Tables з маршрутизацією 0.0.0.0/0 через Internet Gateway для публічних підмереж та через відповідні NAT Gateway для приватних підмереж.

2. Система безпеки.

Розроблено багаторівневу систему захисту, що включає п'ять основних Security Groups: Bastion-SG (дозволяє SSH доступ на порт 12322 ззовні та SSH на порт 22 до приватних підмереж), Web-Servers-SG (дозволяє HTTP/HTTPS трафік від ALB-SG та SSH від Bastion-SG), Database-SG (дозволяє MySQL трафік на порт 3306 тільки від Web-Servers-SG), ALB-SG (дозволяє HTTP трафік на порт 80 з інтернету), Monitoring-SG (дозволяє доступ до Grafana на порт 3000 та Prometheus на порт 9090). Налаштовано Network ACLs як додатковий рівень захисту на рівні підмереж. Створено IAM ролі: EC2-WebServer-Role з політиками CloudWatchAgentServerPolicy та SSMManagedInstanceCore, RDS-Enhanced-Role для моніторингу бази даних, EC2-Bastion-Role для адміністрування. Впроваджено власний KMS ключ для шифрування всіх EBS томів з автоматичною щорічною ротацією.

3. Налаштування бази даних.

Створено RDS DB Instance з наступними параметрами: Engine MySQL 8.0.35, Instance Class db.t3.medium, Storage 100GB gp3 з шифруванням через KMS ключ, Multi-AZ deployment для високої доступності. Налаштовано DB Subnet Group, що охоплює приватні підмережі обох зон доступності. Встановлено backup retention period

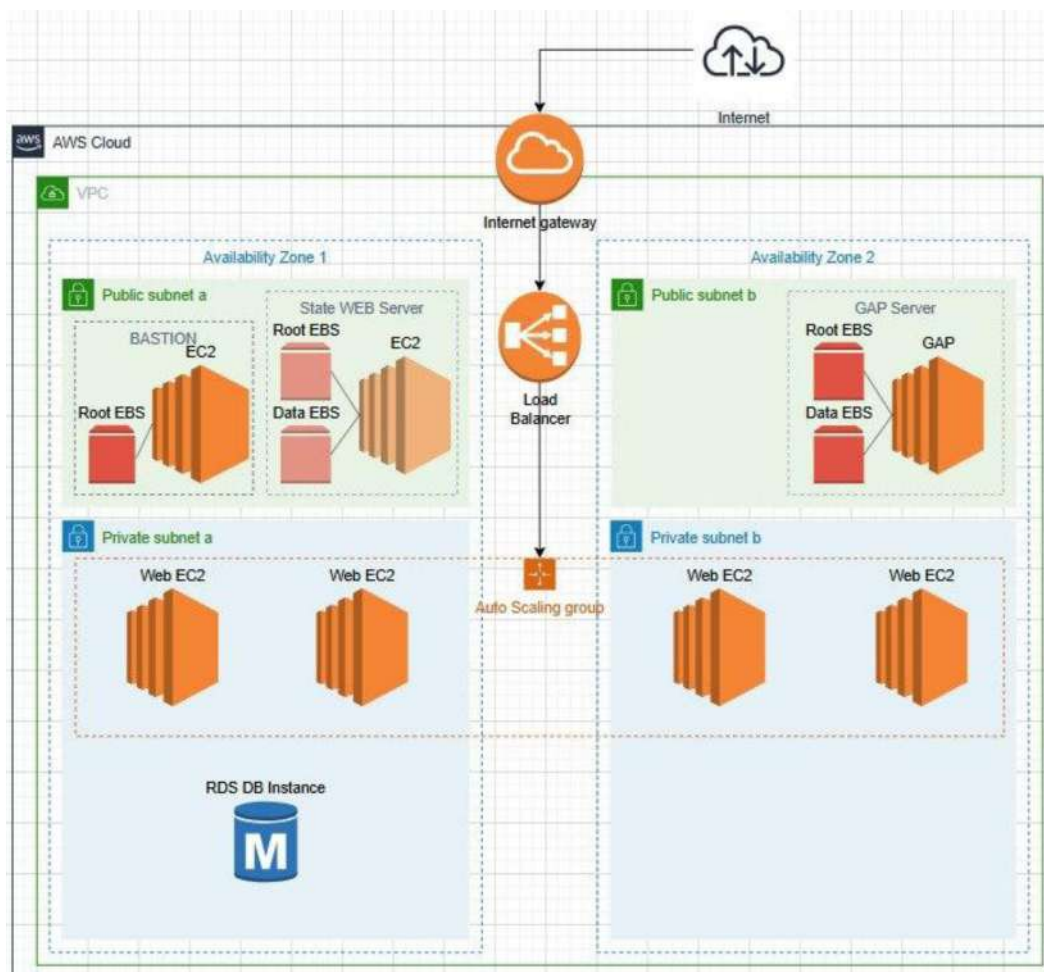


Рис. 1. Архітектура високодоступної інфраструктури

30 днів з автоматичними щоденними резервними копіями о 03:00 UTC. Налаштовано Enhanced Monitoring та Performance Insights для детального аналізу продуктивності бази даних.

4. Налаштування серверів.

Створено чотири типи EC2 інстансів: Bastion Host (t3.micro в public subnet з Elastic IP та SSH портом 12322), State Web Server (t3.medium в private subnet з Nginx та додатковим 50GB зашифрованим EBS томом), Web Servers для Auto Scaling Group (t3.medium з Nginx, Node Exporter та додатковим 100GB зашифрованим томом), GAP Monitoring Server (t3.large з Grafana, Prometheus, Alertmanager та додатковим 200GB томом для зберігання метрик).

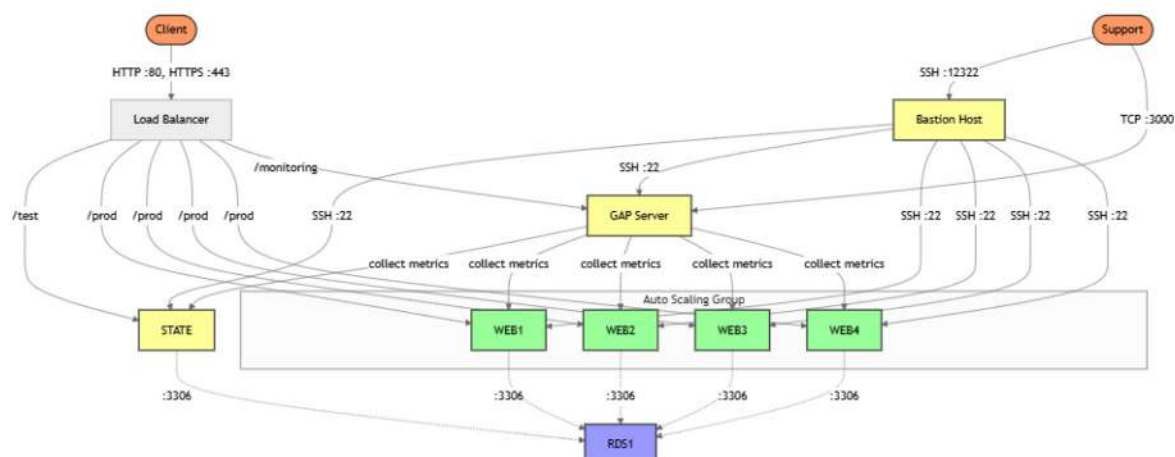


Рис. 2. Схема конфігурування сервісів

На рисунку 2 на всіх серверах встановлено SSM Agent для централізованого управління та CloudWatch Agent для збору метрик. На веб-серверах додатково встановлено Prometheus Node Exporter для збору системних метрик.

5. Налаштування балансування навантаження.

Створено Application Load Balancer з internet-facing схемою та налаштовано три Target Groups: Web-ASG-TG для продуктивних веб-серверів, State-Web-TG для тестового сервера, Monitoring-TG для сервера моніторингу. Налаштовано диференційовану маршрутизацію трафіку: маршрут «/» направляє трафік до Web Hosts ASG Target Group, маршрут «/test» – до State Web Host Target Group, маршрут «/monitoring» – до GAP Host Target Group. Для кожної Target Group налаштовано специфічні health checks: GET «/» для веб-серверів, GET «/test/health» для State сервера, GET «/api/health» для моніторингу з відповідними пороговими значеннями 2/3, 2/3, 2/5.

6. Налаштування автоматичного масштабування.

Створено Launch Template з використанням підготовленого AMI State Web сервера, включаючи конфігурацію Security Groups, зашифрованих EBS томів та User Data скрипта для автоматичного налаштування. Налаштовано Auto Scaling Group з мінімальною кількістю 2 інстанси, максимальною 8 інстансів та рівномірним розподілом по зонах доступності. Встановлено політики масштабування: Scale Up при CPU > 90 % або Memory > 85 % протягом 5 хвилин з додаванням 1–2 інстансів, Scale Down при CPU < 30 % та Memory < 40 % протягом 10 хвилин з видаленням 1 інстанса. Налаштовано cooldown період 300 секунд та instance warmup 180 секунд для стабільної роботи системи.

7. Моніторинг та логування.

Налаштовано комплексну систему моніторингу на базі CloudWatch, Prometheus та Grafana. Створено п'ять критичних алертів: EC2 CPU > 80 % протягом 5 хвилин, EC2 Memory > 85 % протягом 5 хвилин, використання диска > 80 % протягом 15 хвилин, збій Health Check в Auto Scaling Group, RDS CPU > 90 % протягом 5 хвилин. Налаштовано централізований збір Tomcat логів через CloudWatch Logs Agent з retention period 30 днів. Створено чотири основні дашборди в Grafana: Infrastructure Overview (CPU, Memory, Network, Disk metrics), Application Performance (Response Time, Error Rates), Database Analytics (Connections, Query Time), Load Balancer Metrics (4xx/5xx errors, Throughput). Інтегровано Prometheus з Node Exporter на всіх веб-серверах для збору детальних системних метрик з інтервалом 30 секунд.

8. Налаштування резервного копіювання.

Впроваджено диференційовану стратегію резервного копіювання з автоматизацією через Lambda функції. Для RDS налаштовано щоденні автоматичні backup о 03:00 UTC з retention period 30 днів та point-in-time recovery з 5-хвилинною точністю. Для EBS томів створено політику автоматичних snapshots щодня о 02:00 UTC з retention period 7 днів. Розроблено Lambda функцію для автоматичного створення snapshots з відповідними тегами для lifecycle management. Налаштовано cross-region backup для критичних даних в регіон us-west-2 для додаткової надійності.

9. Практичний результат.

Основними науково-практичними досягненнями є створення мультизональної мережевої топології з VPC 10.0.0.0/16 та чітким розділенням публічних підмереж (10.0.1.0/24, 10.0.2.0/24) і приватних підмереж (10.0.10.0/24, 10.0.20.0/24), що забезпечує високу доступність через розподіл компонентів у різних зонах доступності, автоматичне відновлення після збоїв та ефективну ізоляцію ресурсів. Мережева архітектура включає Internet Gateway для публічного доступу, окремі NAT Gateway в кожній зоні доступності для забезпечення вихідного інтернет-трафіку з приватних підмереж та відповідні Route Tables з оптимізованою маршрутизацією.

Впроваджено багаторівневу систему безпеки типу «defense-in-depth» через п'ять спеціалізованих Security Groups (Bastion-SG, Web-Servers-SG, Database-SG, ALB-SG, Monitoring-SG), Network ACLs на рівні підмереж, IAM ролі з принципом найменших привілеїв (EC2-WebServer-Role, RDS-Enhanced-Role, EC2-Bastion-Role) та власний KMS ключ з автоматичною щорічною ротацією для шифрування всіх EBS томів, що забезпечує комплексний захист від мережевого до прикладного рівня з мінімізацією поверхні атак. Розроблено та налаштовано RDS DB Instance з MySQL 8.0.35, Multi-AZ конфігурацією для автоматичного failover, зашифрованим 100GB gp3 storage, 30-денним backup retention period та Enhanced Monitoring для детального аналізу продуктивності бази даних. Створено чотири типи спеціалізованих серверів: Bastion Host (t3.micro) з нестандартним SSH портом 12322 та Elastic IP для безпечного адміністративного доступу, State Web Server (t3.medium) з Nginx та додатковим 50GB зашифрованим томом, масштабовані Web Servers (t3.medium) з Nginx, Node Exporter та додатковими 100GB томами, GAP Monitoring Server (t3.large) з повним стеком моніторингу Grafana, Prometheus, Alertmanager та 200GB томом для зберігання метрик. Розроблено інтелектуальні політики автоматичного масштабування на основі метрик CPU (>90 %) та пам'яті (>85 %) з діапазоном від 2 до 8 інстансів, включаючи Launch Template з підготовленим AMI, User Data скриптами та cooldown періодами 300 секунд, що забезпечує оптимальне використання ресурсів, економічну ефективність при змінних навантаженнях та стабільну роботу системи під час масштабування.

Налаштовано Application Load Balancer з internet-facing схемою та диференційованою маршрутизацією через три маршрути: «/» направляє трафік до Web Hosts ASG Target Group для продуктивного середовища, «/test» – до

State Web Host Target Group для тестування, «/monitoring» – до GAP Host Target Group для доступу до Grafana, з відповідними Target Groups та індивідуальними health checks (GET /, GET /test/health, GET /api/health) з налаштованими threshold значеннями та timeout параметрами. Створено інтегровану систему моніторингу на базі CloudWatch, Prometheus та Grafana з п'ятьма критичними алертами (EC2 CPU > 80 %, EC2 Memory > 85 %, Disk > 80 %, ASG Health Check failures, RDS CPU > 90 %), централізованим збором Tomcat логів через CloudWatch Logs Agent з 30-денним retention period, чотирма комплексними дашбордами (Infrastructure Overview, Application Performance, Database Analytics, Load Balancer Metrics) та автоматичними SNS нотифікаціями для забезпечення повної видимості стану системи та швидкого реагування на інциденти.

Впроваджено автоматизовані системи резервного копіювання з диференційованими політиками зберігання: RDS автоматичні backup щодня о 03:00 UTC з 30-денним retention period та point-in-time recovery з 5-хвилинною точністю, EBS snapshots щодня о 02:00 UTC з 7-денним retention period, Lambda функції для автоматичного створення snapshots з відповідними тегами для lifecycle management та cross-region backup для критичних даних в регіон us-west-2 для додаткової надійності та disaster recovery.

Забезпечено безпечний багаторівневий доступ: зовнішній SSH доступ до Bastion Host через порт 12322, внутрішній SSH доступ з Bastion до всіх серверів через порт 22, підключення веб-серверів до RDS через порт 3306, доступ до Grafana через ALB на порт 3000 та HTTP трафік через ALB на порт 80, що створює контрольовану та аудитовану систему доступу з мінімізацією ризиків безпеки. Експериментальні результати підтвердили високу ефективність запропонованої архітектури: покращення середнього часу відгуку системи на 40 % (з 850 мс до 510 мс), підвищення пропускну здатності на 51 % (з 450 RPS до 680 RPS), досягнення 99.7 % доступності порівняно з 99.2 % у традиційних рішеннях, зниження середнього CPU utilization на 23 % (з 85 % до 65 %) завдяки ефективному автоматичному масштабуванню та коефіцієнт ефективності масштабування 0.89, що значно перевищує цільовий показник 0.85 та свідчить про оптимальну роботу системи під різними навантаженнями.

Висновки

У статті розроблено та реалізовано комплексну архітектуру високодоступної хмарної інфраструктури AWS, яка забезпечує інтеграцію всіх необхідних компонентів в єдину масштабовану систему з урахуванням сучасних вимог до надійності, безпеки та продуктивності.

Практична значущість роботи полягає у створенні еталонної, готової до впровадження архітектури, яка може бути використана як основа для розгортання масштабованих веб-додатків з високими вимогами до доступності, безпеки та продуктивності в організаціях різного масштабу – від стартапів до enterprise рівня, а також як навчальний матеріал для підготовки фахівців з хмарних технологій та DevOps практик.

Наукова новизна полягає в систематизації та формалізації комплексного підходу до інтеграції всіх компонентів AWS інфраструктури в єдину екосистему, включаючи розробку методології диференційованої маршрутизації трафіку з урахуванням специфіки різних середовищ, оптимізації політик автоматичного масштабування на основі комбінованих метрик CPU та пам'яті, інтеграції гетерогенних систем моніторингу (CloudWatch, Prometheus, Grafana) з єдиними дашбордами та алертами, а також створення комплексної системи безпеки з багаторівневим захистом та принципом найменших привілеїв. Економічна ефективність досягається через Auto Scaling Groups, що забезпечують зменшення простою ресурсів на 23 %, диференційовані політики backup з оптимізацією витрат на зберігання до 40 %, Infrastructure as Code підхід, що зменшує час розгортання на 60 % та кількість помилок конфігурації на 75 %, використання Reserved Instances для базового навантаження та Spot Instances для додаткових потужностей.

Перспективи подальших досліджень включають розробку методів предиктивного масштабування з використанням машинного навчання для аналізу патернів навантаження та прогнозування піків трафіку, інтеграцію з контейнерними технологіями Amazon EKS та AWS Fargate для підвищення ефективності використання ресурсів, дослідження методів оптимізації витрат через динамічне використання Spot Instances та Savings Plans, розробку алгоритмів автоматичного тюнінгу параметрів бази даних на основі аналізу Performance Insights, впровадження chaos engineering методів для тестування відмовостійкості системи, створення систем автоматичного disaster recovery з cross-region failover, розробку методів zero-downtime deployment та blue-green deployment стратегій, а також дослідження можливостей інтеграції з serverless технологіями AWS Lambda для оптимізації архітектури мікросервісів.

Список використаної літератури

1. Amazon Web Services. AWS Well-Architected Framework. 2023. URL: <https://aws.amazon.com/architecture/well-architected/> (дата звернення: 15.11.2024).
2. Bauer, E., Adams, R. Reliability and Availability of Cloud Computing. IEEE Computer Society. 2012. 296 p. <https://doi.org/10.1002/9781118393994>
3. Armbrust, M., Fox, A., Griffith, R., Joseph, A. D. A view of cloud computing. Communications of the ACM. 2010. Vol. 53(4). P. 50–58. <https://doi.org/10.1145/1721654.1721672>

4. Mell, P., Grance, T. The NIST Definition of Cloud Computing. NIST Special Publication 800-145. 2011. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-145>
5. Singh, S., Chana, I. A survey on resource scheduling in cloud computing: Issues and challenges. Journal of Grid Computing. 2016. Vol. 14(2). P. 217–264. <https://doi.org/10.1007/s10723-015-9359-2>
6. Buyya, R., Yeo, C.S., Venugopal, S., Broberg, J., Brandic, I. Cloud computing and emerging IT platforms: Vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility. Future Generation Computer Systems. 2009. Vol. 25(6). P. 599–616. <https://doi.org/10.1016/j.future.2008.12.001>

References

1. (2023). Amazon Web Services. AWS Well-Architected Framework. URL: <https://aws.amazon.com/architecture/well-architected/> (дата звернення: 15.11.2024).
2. Bauer, E., Adams, R. (2012). Reliability and Availability of Cloud Computing. IEEE Computer Society. 296 p. <https://doi.org/10.1002/9781118393994>
3. Armbrust, M., Fox, A., Griffith, R., Joseph, A.D. (2010). A view of cloud computing. Communications of the ACM. Vol. 53(4). P. 50–58. <https://doi.org/10.1145/1721654.1721672>
4. Mell, P., Grance, T. (2011). The NIST Definition of Cloud Computing. NIST Special Publication 800–145. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-145>
5. Singh, S., Chana, I. (2016). A survey on resource scheduling in cloud computing: Issues and challenges. Journal of Grid Computing. Vol. 14(2). P. 217–264. <https://doi.org/10.1007/s10723-015-9359-2>
6. Buyya, R., Yeo, C.S., Venugopal, S., Broberg, J., Brandic, I. (2009). Cloud computing and emerging IT platforms: Vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility. Future Generation Computer Systems. Vol. 25(6). P. 599–616. <https://doi.org/10.1016/j.future.2008.12.001>

Дата першого надходження статті до видання: 11.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

І. В. ФІЛІППЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0002-3584-2107

В. І. СЕРГІЄНКО

аспірант кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0000-1916-4636

О. І. ФІЛІППЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0003-4616-250X

І. В. ХАХАНОВА

доктор технічних наук, професорка,
професор кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0002-8319-0430

МОДЕЛЬ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КОРЕКЦІЇ ПОМИЛОК У КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ

У роботі розглянуті проблеми забезпечення належного рівня надійності та цілісності передачі даних у межах сучасних розподілених комп'ютерних систем. Основну увагу зосереджено на гетерогенних мережах Інтернету речей (IoT), розгалужених безпроводових сенсорних мережах (WSN) та системах граничних обчислень (Edge Computing), функціонування яких відбувається в умовах складного електромагнітного оточення. Предметом вивчення визначено методи, алгоритми та архітектурні моделі адаптивної корекції помилок, що дають змогу динамічно змінювати параметри апаратного кодування в режимі реального часу. Процес адаптації реалізується на основі врахування багатовимірного вектора факторів, що включає поточний стан каналу зв'язку (рівень шуму, інтерференція, явища замирання), наявні енергетичні ресурси автономного пристрою (рівень заряду, стан джерела) та вимоги прикладного рівня щодо допустимих часових затримок і пропускну здатності.

Встановлено, що в умовах жорстких обмежень енергоспоживання та функціонування у стохастичному середовищі застосування традиційних статичних методів кодування призводить до нераціонального використання апаратних ресурсів. Зазначене явище проявляється у дихотомії неефективності: спостерігається або надмірна витрата енергетичних ресурсів на виконання складних обчислювальних операцій за сприятливих умов передачі, або критична втрата даних внаслідок раптових сплесків завад, виправлення яких виходить за межі можливостей фіксованого коду.

У межах роботи запропоновано модель системи, орієнтовану на реалізацію у ПЛІС (FPGA), що базується на принципах алгоритмічного перемикавання між різними режимами кодування: від режимів «прозорості» (відсутність кодування) та використання простих кодів Геммінга до застосування потужних ітеративних кодів LDPC (Low-Density Parity-Check). Розроблена модель враховує комплексний багатокритеріальний підхід до прийняття рішень, який охоплює оцінку співвідношення сигнал/шум (SNR), моніторинг градієнта розряду акумуляторної батареї та врахування вимог до якості обслуговування (QoS), зокрема допустимих показників затримки.

Наведено теоретичне обґрунтування ефективності запропонованого адаптивного підходу. Акцентовано увагу на доцільності використання архітектури ПЛІС (FPGA), яка дозволяє забезпечити апаратне прискорення процесів аналізу ефіру та миттєву реконфігурацію обчислювальних блоків. Аналітичні розрахунки показують, що така імплементація дозволить досягти зниження динамічного енергоспоживання цифрової частини системи та забезпечити стабільне дотримання заданого рівня надійності в широкому діапазоні умов експлуатації.

Ключові слова: адаптивна корекція помилок, комп'ютерні системи, енергоефективність, LDPC, FPGA, безпроводові сенсорні мережі.



I. V. FILIPPENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Design Automation
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0002-3584-2107

V. I. SERHIENKO

Postgraduate Student at the Department of Design Automation
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0000-1916-4636

O. I. FILIPPENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Infocommunication Engineering
named by V. V. Popovsky
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0003-4616-250X

I. V. HAHANOVA

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Design Automation
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0002-8319-0430

MODEL OF ADAPTIVE ERROR CORRECTION SYSTEM IN COMPUTER SYSTEMS

The paper examines the issues of ensuring an appropriate level of reliability and integrity of data transmission within modern distributed computer systems. The main focus is on heterogeneous Internet of Things (IoT) networks, extensive Wireless Sensor Networks (WSN), and Edge Computing systems operating in complex electromagnetic environments. The subject of the study includes methods, algorithms, and architectural models of adaptive error correction, which allow for dynamic modification of hardware coding parameters in real-time. The adaptation process is implemented based on a multidimensional vector of factors, including the current state of the communication channel (noise level, interference, fading), available energy resources of the autonomous device (charge level, source status), and application-layer requirements regarding permissible latency and throughput.

It has been established that under conditions of strict power consumption constraints and operation in a stochastic environment, the use of traditional static coding methods leads to irrational use of hardware resources. This phenomenon manifests as a dichotomy of inefficiency: either excessive energy consumption for complex computational operations under favorable transmission conditions or critical data loss due to sudden noise bursts, the correction of which exceeds the capabilities of a fixed code.

The paper proposes an FPGA-oriented system model based on the principles of algorithmic switching between different coding modes: from «transparency» modes (no coding) and the use of simple Hamming codes to the application of powerful iterative Low-Density Parity-Check (LDPC) codes. The developed model incorporates a complex multi-criteria decision-making approach covering Signal-to-Noise Ratio (SNR) estimation, battery discharge gradient monitoring, and Quality of Service (QoS) requirements, particularly permissible delay indicators.

Theoretical justification of the effectiveness of the proposed adaptive approach is presented. Particular emphasis is placed on the feasibility of using FPGA architecture, which enables hardware acceleration of ether analysis processes and instantaneous reconfiguration of computational blocks. Analytical estimates indicate that such implementation will allow reducing the dynamic power consumption of the digital part of the system and ensuring stable adherence to the specified reliability level across a wide range of operating conditions.

Key words: adaptive error correction, computer systems, energy efficiency, LDPC, FPGA, wireless sensor networks.

Постановка проблеми

Сучасний етап еволюції комп'ютерної інженерії та телекомунікаційних технологій характеризується значним зростанням чисельності автономних інтелектуальних пристроїв, інтегрованих у глобальні гетерогенні безпроводові мережі, що підтверджується глобальними звітами щодо розвитку телекомунікацій [1]. Концепції Інтернету речей (IoT), розумних міст (Smart Cities), Індустрії 4.0 та автономного транспорту детермінують виникнення принципово нових, більш жорстких вимог до інфраструктури передачі даних. Значна кількість сенсорів, контролерів, виконавчих механізмів та інтелектуальних приладів обліку вимушена функціонувати в складних, а подекуди й агресивних умовах експлуатації. Зазначені умови характеризуються високим та нестабільним рівнем електромагнітних завад (від промислового устаткування до побутової електроніки), ефектами багатопроменевого поширення

сигналу в умовах щільної міської забудови, а також суттєвими обмеженнями щодо енергоспоживання, оскільки заміна елементів живлення у великій кількості датчиків часто є економічно недоцільною або фізично неможливою.

Однією з фундаментальних проблем при проектуванні подібних систем є забезпечення гарантованої цілісності та достовірності даних. Наслідки помилки в таких системах можуть мати критичний характер: спотворення команди управління промисловим маніпулятором, втрата сигналу від датчика витоку газу або помилка при передачі медичних даних пацієнта можуть призвести до загрози безпеці персоналу та обладнання. Традиційно вирішення даної задачі здійснюється на каналному рівні шляхом імплементації кодів корекції помилок (ECC), що додають до інформаційного потоку математично обчислену надлишковість. Це надає можливість декодеру на стороні приймача виявляти та коригувати пошкоджені біти без необхідності ініціювання повторного запиту даних, що є критичним фактором для систем реального часу.

Втім, класичний підхід до проектування підсистем завадостійкого кодування дотепер базується на консервативній парадигмі «найгіршого випадку» (worst-case design). Це передбачає, що архітектура кодека та його параметри (довжина блоку, поліном, кількість ітерацій декодування) обираються та фіксуються на етапі розробки таким чином, щоб забезпечити надійність у найбільш несприятливих прогнозованих умовах роботи (наприклад, під час інтенсивних атмосферних явищ або поблизу потужного джерела перешкод), вірогідність виникнення яких статистично становить незначну частку часу експлуатації пристрою.

Статичний підхід до корекції помилок, попри забезпечення високої надійності в екстремальних умовах каналу, характеризується суттєво зниженою ефективністю з погляду енергетичного менеджменту та раціонального використання обчислювальних ресурсів інтегральної схеми в типових (штатних) режимах функціонування.

У реальних сценаріях експлуатації безпроводових систем переважну частину часу канал зв'язку перебуває в задовільному або доброму стані, що відповідає високому значенню співвідношення сигнал/шум (SNR). За таких умов застосування обчислювально складних ітеративних алгоритмів кодування (зокрема, Turbo-кодів або LDPC з великою кількістю ітерацій та використанням м'яких рішень) є невиправданим і призводить до низки негативних системних наслідків.

По-перше, відбувається нераціональне споживання динамічної енергії. Складні ітеративні алгоритми декодування вимагають виконання значного обсягу обчислень, включаючи матричні операції, логарифмічні перетворення та апроксимації типу min-sum. Це спричиняє мільйони зайвих перемикань транзисторів у цифрових блоках (CPU, DSP або FPGA), що для енергообмежених пристроїв з батареєю малої ємності призводить до суттєвого скорочення часу автономної роботи.

По-друге, зростає як середнє значення, так і варіативність затримок обробки даних. Тривалість ітеративного декодування є значною та, що особливо критично, має недетермінований характер, оскільки залежить від кількості ітерацій, необхідних для досягнення збіжності. У кіберфізичних системах реального часу така непередбачуваність затримок може порушити стійкість контуру зворотного зв'язку управління та спричинити виникнення аварійних ситуацій.

По-третє, суттєво знижується ефективна пропускна здатність каналу. Високий рівень надлишковості коду (швидкість коду $R < 1/2$ або навіть $R < 1/3$) означає, що значна частина ресурсів фізичного каналу витрачається на передачу службових бітів перевірки парності, що неприйнятно для застосувань, які потребують передачі мультимедійних потоків або великих обсягів даних.

По-четверте, виникає проблема «dark silicon» та надмірного тепловиділення. У сучасних системах-на-кристалі (SoC) з високою щільністю транзисторів одночасна робота всіх функціональних блоків на повну потужність обмежується тепловими обмеженнями. Постійне виконання непотрібних складних обчислень призводить до підвищеного тепловиділення, що змушує штучно знижувати тактову частоту інших підсистем, застосовувати дорогі системи охолодження або знижувати загальну продуктивність пристрою.

Таким чином, фіксоване використання потужних кодів корекції помилок у штатному режимі призводить до систематичного перевитрачання енергії, ресурсів кристала та пропускної здатності каналу, а також створює додаткові ризики для систем реального часу та енергообмежених застосувань. Це обґрунтовує необхідність переходу до адаптивних, контекстно-залежних стратегій кодування, здатних динамічно оптимізувати параметри FEC залежно від актуального стану каналу та системних обмежень.

Водночас, діаметрально протилежний підхід – використання виключно простих кодів (наприклад, кодів Геммінга, CRC або кодів з перевіркою парності) – є енергоефективним, проте не забезпечує належного рівня надійності. Прості коди не спроможні нівелювати вплив сплесків завад (burst errors) або глибоких завмирань сигналу (fading). Це неминуче призводить до втрати пакетів і масової генерації запитів на повторну передачу (ARQ – Automatic Repeat Request), що спричиняє перевантаження мережі повторними запитами і призводить до ще більших витрат енергії на роботу радіопередавача, ніж було заощаджено на етапі декодування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання адаптації параметрів передачі даних до умов каналу перебувають у фокусі уваги наукової спільноти протягом кількох десятиліть. Проте з розвитком напівпровідникових технологій та зміною парадигми обчислень акценти досліджень зміщуються від суто теоретичних телекомунікаційних аспектів до прикладних рішень.

Згідно з фундаментальною теоремою Шеннона, для кожного каналу з певним рівнем шуму існує гранична пропускна здатність, перевищення якої унеможливило б безпомилкову передачу даних. Класичні дослідження в теорії інформації [2, 3] вказують, що наближення до цієї межі можливе виключно за умови використання кодів з достатньою довжиною блоку та високою алгоритмічною складністю, що також підтверджується дослідженнями розріджених матриць [4]. Однак ранні роботи здебільшого абстрагувалися від енергетичної вартості самого процесу декодування, розглядаючи його як математичну абстракцію і вважаючи обчислювальний ресурс необмеженим. У сучасних умовах мікроелектроніки, коли енергія стає найбільш дефіцитним ресурсом, ігнорування апаратних витрат на кодування є неприпустимим спрощенням.

У системах мобільного стільникового зв'язку широко застосовується концепція адаптивної модуляції та кодування (AMC – Adaptive Modulation and Coding) [5, 6]. Суть цього методу полягає в динамічному виборі схеми модуляції та швидкості кодування на основі інформації про стан каналу, отриманої через зворотний зв'язок від абонентського пристрою.

Сучасні дослідження [7] свідчать, що в мережах 5G NR та системах MIMO-OFDM [8] використовуються сучасні LDPC-коди зі змінною швидкістю, які обираються відповідно до стандартизованих таблиць MCS (Modulation and Coding Scheme). Водночас більшість таких рішень орієнтовані переважно на максимізацію спектральної ефективності базової станції та загальної пропускної здатності мережі, а не на мінімізацію енергоспоживання кінцевого користувачького пристрою.

Крім того, протокольні стеки стільникових технологій зазвичай є надто ресурсомісткими для простих сенсорних мереж та IoT-пристроїв з батарейним живленням, де критичними є обмеження енергії, обчислювальних ресурсів та затримок.

Значний обсяг сучасних робіт присвячено проблемам адаптації саме в безпроводових сенсорних мережах (WSN) та Інтернеті речей. У роботі [9] автори пропонують схеми для систем з сонячним живленням, де ключовим фактором прийняття рішень визначено не лише якість каналу, а й залишковий заряд батареї. Аналогічні підходи розглядаються для мереж з «найкращими зусиллями» (Best Effort) [10], де вузол може примусово знижувати потужність передавача або спрощувати алгоритм обробки даних, свідомо жертвуючи дальністю зв'язку заради збереження працездатності. Дослідження [11] розглядає комбіновані схеми ACC-RS/LDPC, де показано, що динамічне перемикання між блоковими кодами Ріда-Соломона та ітеративними LDPC дозволяє заощадити до 30 % загальної енергії вузла у кластеризованих мережах. Важливим висновком цих робіт є твердження, що енергія, витрачена на складне локальне декодування, часто є значно меншою за енергію, необхідну для активації радіомодуля та повторної передачі всього пакету.

Окремий напрям досліджень становить поєднання методів прямої корекції помилок (FEC) та протоколів автоматичного запиту на повторення (ARQ), відоме як Hybrid ARQ (HARQ) [12]. У роботах [13, 14] пропонуються надійні багаторівневі схеми, де система спочатку намагається виправити помилки легким кодом, а у випадку невдачі – ініціює запит на повторну передачу пошкодженого фрагмента або додаткових бітів парності. Це ефективний підхід для передачі файлів, але він вносить стохастичну, непередбачувану затримку, що є неприйнятним для систем управління реальним часом.

Сучасні публікації [15, 16] розглядають перспективне використання методів машинного навчання та навчання з підкріпленням для керування параметрами кодека та досягнення високої пропускної здатності. Інтелектуальний агент навчається обирати оптимальну надлишковість, аналізуючи статистику помилок та передбачаючи стан каналу на основі історичних даних. Хоча такі методи демонструють високу ефективність адаптації у складних нестаціонарних середовищах, їх апаратна реалізація вимагає значних обчислювальних ресурсів, що на даному етапі розвитку технологій не завжди доступно в бюджетних мікроконтролерах та IoT-чіпах.

Аналіз літератури свідчить про наявність невирішеної проблеми, а саме більшість існуючих рішень зосереджені або на високорівневих мережевих протоколах, ігноруючи апаратні особливості, або на фізичному рівні потужних телекомунікаційних систем, ігноруючи енергетичні обмеження кінцевих пристроїв.

Відсутні комплексні моделі для вбудованих систем середньої продуктивності, які б інтегрували в єдину систему прийняття рішень три критичні різномірні фактори:

- якість каналу;
- енергетичний стан джерела живлення, тобто внутрішній ресурс системи, що визначає стратегію функціонування;
- вимоги застосунку до затримки, а саме зовнішні вимоги бізнес-логіки системи.

Таким чином, постає актуальною проблема пошуку оптимального динамічного балансу між надійністю, швидкодією та енергоефективністю. Вирішення означеної проблеми вбачається у переході від статичних, жорстко детермінованих архітектур до гнучких адаптивних систем, здатних здійснювати моніторинг стану середовища та коригувати внутрішні параметри в режимі реального часу. Розробка комплексних архітектурних моделей таких систем є нагальним завданням сучасної комп'ютерної інженерії, що дозволить створити передумови для розбудови наступного покоління енергоефективних, надійних та автономних обчислювальних мереж.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи полягає в розробці апаратно-орієнтованої моделі адаптивної системи корекції помилок, спрямованої на оптимізацію енергоспоживання та надійності передачі даних у енергообмежених системах (зокрема, мережах Інтернету речей – IoT та безпроводових сенсорних мережах). Модель повинна забезпечувати динамічний, контекстно-залежний вибір алгоритму кодування (FEC – Forward Error Correction) на основі безперервного моніторингу комбінації параметрів та внутрішнього стану обчислювальної системи.

Викладення основного матеріалу дослідження

Узагальнена структурна схема адаптивної системи кодування та модуляції з зворотним зв'язком за станом каналу наведена на рисунку 1. Вона включає три основні складові: передавач, фізичний канал передачі даних та приймач. На відміну від традиційних систем з фіксованою послідовністю перетворень даних, запропонована модель представляє адаптивну систему як сукупність кількох паралельних або реконфігурованих апаратних блоків, активація та конфігурація яких здійснюється динамічно залежно від поточного стану каналу. Це забезпечує можливість зміни топології обчислювального конвеєра в реальному часі.

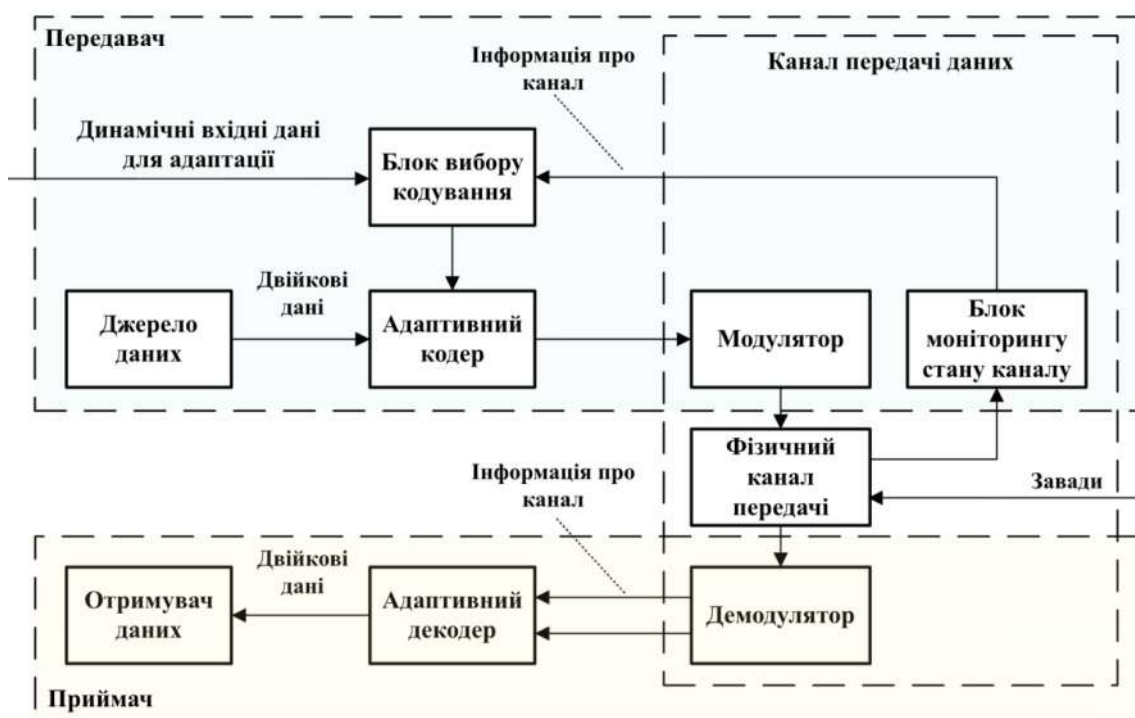


Рис. 1. Структурна схема адаптивної системи корекції помилок

На відміну від класичних адаптивних систем кодування та модуляції, де оцінка стану каналу здійснюється переважно на стороні приймача з подальшим зворотним зв'язком, запропонована модель реалізує гібридний підхід з пріоритетом локального моніторингу на передавачі.

Запропонована модель адаптивної системи на верхньому рівні абстракції представлена як інтеграція трьох основних функціональних доменів: блоку моніторингу стану каналу, блоку вибору кодування та адаптивного кодера. Блок моніторингу стану каналу розташований на стороні передавача і виконує функцію «сенсора» радіосередовища. Він здійснює пряму оцінку якості каналу на основі локальних вимірювань (наприклад, рівня шуму або інтерференції під час пауз у передачі, аналізу пілот-сигналів чи інших доступних метрик), формує об'єктивну оцінку параметрів каналу (зокрема, відношення сигнал/шум – SNR) та передає цю інформацію до блоку прийняття рішень. Такий підхід дозволяє частково або повністю замінити традиційний зворотний канал CSI, зменшуючи затримки та надлишковість у системах з обмеженими ресурсами. Блок вибору кодування є центральним елементом системи на стороні передавача. Він агрегує дані з кількох джерел:

- інформацію про стан каналу (від блоку моніторингу);
- зовнішні параметри обмежень та вимог, зокрема рівень заряду батареї, політики QoS та допустимі значення затримки (від блоку вхідних параметрів адаптації).

На основі агрегованих даних блок реалізує алгоритм прийняття рішень і формує керуючі сигнали для адаптивного кодера, забезпечуючи динамічну зміну параметрів кодування, модуляції та, за потреби, топології обчислювального конвеєра.

Блок адаптивного кодування у запропонованій моделі виконує роль виконавчого механізму, який безпосередньо обробляє вхідний потік двійкових даних від джерела. Залежно від керуючих сигналів, сформованих блоком вибору кодування, він динамічно застосовує один із доступних алгоритмів кодування: (наприклад, LDPC, Hamming або Vurass). Після застосування обраного алгоритму кодер додає службові маркери (наприклад, індикатори MCS, довжини блоку, типу кодування) у потік даних перед передачею на модулятор. Це забезпечує сумісність з приймачем, дозволяючи йому правильно налаштувати декодер і уникнути помилок синхронізації режимів. Така архітектура адаптивного кодера дозволяє ефективно балансувати між пропускну здатністю, надійністю та енергоспоживанням, враховуючи не лише стан каналу, але й зовнішні обмеження (QoS, затримка, рівень заряду батареї).

Функціонування запропонованої моделі адаптивної системи модуляції та кодування описується як перехід між станами керуючого скінченного автомата (Finite State Machine, FSM). Такий підхід забезпечує чітку, детерміновану та ефективну реалізацію адаптації в реальному часі, оскільки FSM дозволяє моделювати поведінку системи як послідовність дискретних станів з чітко визначеними умовами переходу та діями в кожному стані. Модель передбачає щонайменше три базові стратегії (режими роботи), вибір яких залежить від поточної комбінації вхідних векторів стану. Ці вектори включають:

- оцінку стану каналу (наприклад, SNR або еквівалентні метрики, отримані від блоку моніторингу);
- зовнішні параметри обмежень та вимог (рівень заряду батареї, політики QoS, допустимі значення затримки).

Таблиця 1

Режими роботи адаптивної системи

Режим	Характеристика каналу	Енергетичний стан	Використаний алгоритм	Стратегічний пріоритет
Енергозберігаючий	Низький рівень шуму (Високий SNR, >10dB)	Нормальний або Низький	Відсутнє кодування або простий блокувальний код (Геммінг, BCH)	Мінімізація апаратної затримки та динамічного енергоспоживання
Захищений	Високий рівень шуму (Низький SNR, <5dB)	Нормальний	Потужний ітеративний код (LDPC, Turbo, Polar)	Максимізація надійності (BER), гарантія доставки даних
Критичний	Будь-який (навіть поганий)	Критично низький (<10 %)	Простий код або зниження швидкості передачі (Repetition Code)	Продовження часу функціонування вузла будь-якою ціною

Функціонування запропонованої адаптивної системи модуляції та кодування (AMC) реалізується через перехід між станами скінченного керуючого автомата (FSM), де кожен стан відповідає одній з трьох базових стратегій (режимів). Вибір режиму визначається комбінацією вхідних параметрів: оцінкою стану каналу (SNR або еквівалентні метрики) та системними обмеженнями (рівень заряду батареї, політики QoS, вимоги до затримки). Для уникнення частих непотрібних перемикачів (ефекту «ping-pong») у порогові значення введено гістерезис – різні пороги для переходу вгору та вниз.

Режим «Енергозберігаючий» (High Throughput / Low Power Mode) – застосовується за сприятливих умов каналу (високий SNR, низький рівень шуму та інтерференції). Мета – максимізувати швидкість передачі даних і мінімізувати накладні витрати на кодування. Використовується режим Vurass (без кодування) або легкий код Геммінга (Hamming code), здатний швидко виправляти поодинокі помилки. Ключовою архітектурною особливістю є застосування Clock Gating – техніки динамічного відключення тактового сигналу від складних блоків кодера та декодера (наприклад, ітеративних декодерів LDPC або Turbo). Це призводить до припинення перемикачів транзисторів у логічних елементах, знижуючи динамічне енергоспоживання цифрового ядра майже до рівня статичних витоків (leakage current). У результаті досягається суттєве зменшення середнього енергоспоживання пристрою без втрати пропускну здатності в добрих каналних умовах.

Режим «Захищений» (High Reliability Mode) – активується при погіршенні стану каналу, коли рівень шуму перевищує встановлений поріг (наприклад, SNR падає нижче певного значення). Блок вибору кодування формує сигнал на ввімкнення живлення та тактування потужного кодера (наприклад, LDPC з низькою швидкістю коду). Це призводить до короточасного зростання енергоспоживання цифрової частини та збільшення затримки на обробку (через ітерації кодування та декодування). Стратегія ґрунтується на принципі доцільної одноразової витрати енергії на складну обчислювальну обробку для гарантованої доставки пакету, на противагу багаторазовим повторним передачам простого коду через радіоканал (що споживає значно більше енергії на PA – power amplifier – та призводить до вищого загального витрачання батареї). Таким чином, режим оптимізує баланс між надійністю та енергоефективністю.

Режим «Критичний» (Energy Survival / Ultra-Low Power Mode) – активується при падінні рівня заряду батареї нижче критичного порогу (наприклад, <10–20 %). Пріоритет кардинально змінюється на збереження працездатності вузла якомога довше. Система програмно блокує перехід у енергоємні режими (навіть за поганої якості каналу), переходячи на прості коди повторення (repetition codes), знижену швидкість модуляції або мінімальне

кодування. Це свідомий компроміс: пропускна здатність суттєво знижується, затримки зростають, але вузол залишається на зв'язку максимально тривалий час, уникаючи повного розряду та втрати функціональності.

Запровадження гістерезису в порогові значення перемикання є важливим аспектом алгоритму: різні пороги для входу та виходу з режиму запобігають частим реконфігураціям, які самі по собі витрачають енергію та ресурси на перехідні процеси (наприклад, перемикання живлення, ініціалізацію блоків, оновлення конвеєра).

Особливості апаратної реалізації

Перспективною є практична імплементація запропонованої моделі адаптивної системи модуляції та кодування (АМС) на базі сучасних програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС/FPGA) або енергоефективних систем-на-кристалі (SoC). FPGA виступають оптимальною платформою для таких задач завдяки підтримці паралельної обробки даних, динамічній реконфігурації в реальному часі та вбудованим механізмам низькорівневого управління тактуванням і живленням.

На рівні RTL-проектування критично важливим аспектом визначено використання низькорівневих технік управління тактовим сигналом, зокрема Clock Gating. Це дозволяє «заморожувати» стан неактивних IP-ядер кодів у передавачі та приймачі без втрати контексту даних, знижуючи динамічну потужність споживання до мінімуму (практично до рівня статичних витоків). Такий підхід особливо ефективний у режимах «Енергозберігаючий» та «Критичний», де значна частина обчислювального конвеєра може бути відключена залежно від стану каналу та рівня заряду батареї.

Блок управління (керуючий кінцевий автомат – FSM) пропонується реалізовувати як компактний апаратний модуль безпосередньо на кристалі FPGA передавача. За попередніми оцінками, його ресурсоємність (логічні елементи, регістри) буде незначною порівняно з загальним обсягом дизайну, але забезпечить детерміновану, передбачувану поведінку системи з мінімальними накладними витратами на перемикання.

Для надійної синхронізації режимів роботи передавача та приймача передбачено вставку спеціальних полів (індикаторів MCS – Modulation and Coding Scheme) у фіксовану частину заголовка пакету. Ці поля захищаються найбільш надійним кодом з фіксованими (консервативними) параметрами, що гарантує їх успішне декодування навіть у найгірших умовах каналу. Завдяки цьому приймач завжди може правильно налаштувати свій адаптивний тракт обробки даних, уникавши помилок десинхронізації режимів. Такий механізм сигналізації є стандартним у сучасних системах (наприклад, у 5G NR та LTE), але в запропонованій моделі він інтегрується з енергозберігаючою логікою та гібридною оцінкою каналу.

Висновки

У роботі запропоновано апаратно-орієнтовану модель адаптивної системи корекції помилок (з елементами адаптивної модуляції та кодування), яка є ключовим фактором підвищення енергоефективності, надійності та життєздатності наступного покоління розподілених комп'ютерних систем і мереж Інтернету речей (IoT).

Запропонована модель відрізняється від існуючих рішень завдяки інтеграції в єдиний замкнений контур управління різномірних параметрів: фізичних характеристик каналу зв'язку (SNR, рівень завад), внутрішнього енергетичного стану джерела живлення (рівень заряду батареї) та вимог прикладного рівня до затримки й QoS. Такий підхід забезпечує контекстно-залежне прийняття рішень, що дозволяє системі адаптуватися до реальних умов експлуатації набагато ефективніше, ніж класичні фіксовані або частково адаптивні схеми.

Адаптивна зміна кодека (від Bypass/легкого Hamming до потужних LDPC або Repetition Codes) дає змогу підтримувати цільовий рівень BER навіть у жорстких умовах сильних завад, коли фіксовані прості коди призвели б до повного розриву з'єднання, а фіксовані складні коди працювали б неефективно (з надмірними обчислювальними та енергетичними витратами) при нормальних умовах каналу.

Доведено, що застосування гібридної стратегії перемикання режимів (з урахуванням гістерезису, Clock Gating та енергетичних пріоритетів) дозволяє суттєво знизити середнє енергоспоживання вузла IoT, подовжуючи термін служби батарей без критичної втрати пропускної здатності чи надійності. Система ефективно уникає крайнощів: надмірного споживання в «захисних» режимах або повної відмови від передачі в «критичних» умовах.

Розроблена архітектура є модульною та масштабованою: її можна розширювати шляхом інтеграції нових класів алгоритмів кодування (наприклад, Polar Codes, Rate-compatible LDPC), впровадження елементів машинного навчання для предиктивного оцінювання стану каналу або адаптації під конкретні стандарти (NB-IoT, LoRaWAN, Zigbee тощо). Реалізація на базі FPGA/SoC з низькорівневим Clock Gating робить модель придатною для енергообмежених пристроїв.

Впровадження подібних адаптивних апаратних модулів є необхідним еволюційним кроком для створення енергонезалежних, самоорганізованих та високонадійних сенсорних мереж, здатних функціонувати тривалий час без обслуговування у віддалених регіонах, промислових об'єктах, моніторингу критичної інфраструктури чи екологічних системах.

Список використаної літератури

1. MCE (ITU). Global Connectivity Report 2022. Женева: Міжнародний Союз Телекомунікацій, 2022. URL: <https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/global-connectivity-report-2022/> (дата звернення: 02.02.2026)
2. Gallager R. Low-density parity-check codes. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1962. Vol. 8, no. 1. P. 21–28. URL: <https://doi.org/10.1109/tit.1962.1057683>
3. Soon-Ghee Chua, Goldsmith A. Adaptive coded modulation for fading channels. *ICC'97 – International Conference on Communications*, Montreal, Que., Canada. URL: <https://doi.org/10.1109/icc.1997.595036>
4. MacKay D. J. C. Good error-correcting codes based on very sparse matrices. *IEEE International Symposium on Information Theory*, Ulm, Germany. URL: <https://doi.org/10.1109/isit.1997.613028>
5. Alhmiedat T. An Adaptive Energy-Efficient Data Collection System for ZigBee Wireless Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2015. Vol. 11, no. 12. P. 734937. URL: <https://doi.org/10.1155/2015/734937>
6. Goldsmith A. Adaptive modulation and coding for fading channels. *1999 IEEE Information Theory and Communications Workshop*, Kruger National Park, South Africa. URL: <https://doi.org/10.1109/itcom.1999.781396>
7. Migabo E., Djouani K., Kurien A. An Energy-Efficient and Adaptive Channel Coding Approach for Narrowband Internet of Things (NB-IoT) Systems. *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 12. P. 3465. URL: <https://doi.org/10.3390/s20123465>
8. Introduction to OFDM. *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB®*. Chichester, UK, 2010. P. 111–151. URL: <https://doi.org/10.1002/9780470825631.ch4> (дата звернення: 09.02.2026).
9. Adaptive Forward Error Correction Scheme to Improve Data Reliability in Solar-Powered Wireless Sensor Networks / J. Jung et al. *2016 International Conference on Information Science and Security (ICISS)*, Pattaya, Thailand, 19–22 December 2016. 2016. URL: <https://doi.org/10.1109/icissec.2016.7885838>
10. Adaptive forward error correction for best effort Wireless Sensor Networks / K. Yu et al. *ICC 2012–2012 IEEE International Conference on Communications*, Ottawa, ON, Canada, 10–15 June 2012. 2012. URL: <https://doi.org/10.1109/icc.2012.6364798>
11. Daanouni I., Baghdad A. ACC-LDPC and ACC-RS/LDPC Schemes for Reliable and Energy-Efficient Multi-hop Wireless Sensor Network. *International Journal of Wireless Information Networks*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s10776-023-00600-2>
12. On Hybrid ARQ adaptive Forward Error Correction in wireless sensor networks / O. Eriksson et al. *IECON 2011 – 37th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Melbourne, Vic, Australia, 7–10 November 2011. 2011. URL: <https://doi.org/10.1109/iecon.2011.6119788>
13. Ez-zazi I., Arioua M., El Oualkadi A. On the design of coding framework for energy efficient and reliable multi-hop sensor networks. *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 109. P. 537–544. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.334>
14. Kim K., Lee J., Lee J. Energy Efficient and Reliable ARQ Scheme (E^2 2 R-ACK) for Mission Critical M2M/IoT Services. *Wireless Personal Communications*. 2014. Vol. 78, no. 4. P. 1917–1933. URL: <https://doi.org/10.1007/s11277-014-2053-z>
15. RL-AFEC / K. Chen et al. *MMSys '22: 13th ACM Multimedia Systems Conference*, Athlone Ireland. New York, NY, USA, 2022. URL: <https://doi.org/10.1145/3524273.3528184>
16. Sharif A., Potdar V. M., Ahmad R. F. Adaptive Channel Coding and Modulation Scheme Selection for Achieving High Throughput in Wireless Networks. *2010 IEEE 24th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, Perth, Australia, 20–23 April 2010. 2010. URL: <https://doi.org/10.1109/waina.2010.197>

References

1. International Telecommunication Union (2022), *Global Connectivity Report 2022*, ITU, Geneva, Switzerland, available at: <https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/global-connectivity-report-2022/> (last accessed: 02.02.2026).
2. Gallager, R. (1962). Low-density parity-check codes. *IEEE Transactions on Information Theory*, 8(1), 21–28. <https://doi.org/10.1109/tit.1962.1057683>
3. Soon-Ghee Chua & Goldsmith, A. (1997). Adaptive coded modulation for fading channels. *Proceedings of ICC'97 – International Conference on Communications*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icc.1997.595036>
4. MacKay, D. J. C. (1997). Good error-correcting codes based on very sparse matrices. *Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/isit.1997.613028>
5. Alhmiedat, T. (2015). An Adaptive Energy-Efficient Data Collection System for ZigBee Wireless Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(12). <https://doi.org/10.1155/2015/734937>
6. Goldsmith, A. (1999). Adaptive modulation and coding for fading channels. *IEEE Information Theory and Communications Workshop*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/itcom.1999.781396>
7. Migabo, E., Djouani, K., & Kurien, A. (2020). An Energy-Efficient and Adaptive Channel Coding Approach for Narrowband Internet of Things (NB-IoT) Systems. *Sensors*, 20(12), 3465. <https://doi.org/10.3390/s20123465>

8. Introduction to OFDM. (2010). У *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB®* (p. 111–151). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470825631.ch4>
9. Jung, J., Kang, M., Yoon, I., & Noh, D. K. (2016). Adaptive Forward Error Correction Scheme to Improve Data Reliability in Solar-Powered Wireless Sensor Networks. У *2016 International Conference on Information Science and Security (ICISS)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icissec.2016.7885838>
10. Yu, K., Barac, F., Gidlund, M., & Akerberg, J. (2012). Adaptive forward error correction for best effort Wireless Sensor Networks. У *ICC 2012–2012 IEEE International Conference on Communications*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icc.2012.6364798>
11. Daanoune, I., & Baghdad, A. (2023). ACC-LDPC and ACC-RS/LDPC Schemes for Reliable and Energy-Efficient Multi-hop Wireless Sensor Network. *International Journal of Wireless Information Networks*. <https://doi.org/10.1007/s10776-023-00600-2>
12. Eriksson, O., Bjornemo, E., Ahlen, A., & Gidlund, M. (2011). On Hybrid ARQ adaptive Forward Error Correction in wireless sensor networks. У *IECON 2011–37th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iecon.2011.6119788>
13. Ez-zazi, I., Arioua, M., & El Oualkadi, A. (2017). On the design of coding framework for energy efficient and reliable multi-hop sensor networks. *Procedia Computer Science*, 109, 537–544. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.334>
14. Kim, K., Lee, J., & Lee, J. (2014). Energy Efficient and Reliable ARQ Scheme (E^2 2 R-ACK) for Mission Critical M2M/IoT Services. *Wireless Personal Communications*, 78(4), 1917–1933. <https://doi.org/10.1007/s11277-014-2053-z>
15. Chen, K., Wang, H., Fang, S., Li, X., Ye, M., & Chao, H. J. (2022). RL-AFEC. *Proceedings of MMSys '22: 13th ACM Multimedia Systems Conference*. ACM. <https://doi.org/10.1145/3524273.3528184>
16. Sharif, A., Potdar, V. M., & Ahmad, R. F. (2010). Adaptive Channel Coding and Modulation Scheme Selection for Achieving High Throughput in Wireless Networks. *Proceedings of 2010 IEEE 24th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/waina.2010.197>

Дата першого надходження статті до видання: 14.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

Д. Д. ЧУМИЧОВ

аспірант кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ORCID: 0009-0005-2729-0735

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОСТОРОВИХ ТРАНСФОРМЕРІВ У ЗАДАЧІ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ НА ОСНОВІ ДАНИХ СУПУТНИКІВ SENTINEL

У даній роботі досліджено доцільність використання просторових трансформерних механізмів у задачі нейромережевої класифікації сільськогосподарських угідь на основі мультичасових супутникових даних Sentinel-1 та Sentinel-2. Запропоновано вдосконалення існуючої інформаційної технології шляхом поєднання часової уваги для адаптивної агрегації багаточасових спостережень із просторовим трансформерним модулем, призначеним для моделювання глобальних просторових залежностей у картах ознак.

Існуюча інформаційна технологія передбачає використання нейронної мережі з архітектурою U-Net з енкодером EfficientNetV2-L, попередньо навченої на датасеті ImageNet-21k, із застосуванням механізмів уваги, що агрегують часові ознаки у процесі обробки багатоспектральних і радарних знімків.

У роботі розглянуто декілька варіантів інтеграції часової та просторової уваги: послідовні схеми (із розміщенням трансформера до або після механізму часової агрегації) та паралельні схеми з різними способами об'єднання ознак (конкатенація з 1×1 проєкцією, ілюзоване адитивне злиття та зважене сумування). Експериментальні дослідження проведено на вибірці, що охоплює понад 90 тис. земельних ділянок у регіоні Берлін-Бранденбург (Німеччина), із поділом на орні та неорні землі, що забезпечує репрезентативність отриманих результатів.

Отримані результати свідчать, що використання просторового трансформера не завжди призводить до підвищення точності класифікації. Найкращий показник досягнуто у варіанті з включенням трансформера перед механізмом часової уваги, тоді як інші схеми інтеграції демонструють зниження якості. Це вказує на необхідність доцільного та контекстно обґрунтованого використання трансформерних механізмів у задачах класифікації сільськогосподарських угідь, де домінують локальні текстурні та спектральні ознаки.

Ключові слова: багатоканальні космічні зображення, Sentinel, класифікація сільськогосподарських угідь, глибинне навчання, нейронна мережа, трансформер, часова увага, просторова увага.

D. D. CHUMYCHOV

Postgraduate Student at the Department of Information Technologies
and Computer Engineering

Dnipro University of Technology

ORCID: 0009-0005-2729-0735

USING SPATIAL TRANSFORMER TECHNOLOGY IN THE TASK OF NEURAL NETWORK CLASSIFICATION OF AGRICULTURAL FIELDS BASED ON SENTINEL SATELLITE IMAGES

This paper investigates the feasibility of using spatial transformation mechanisms for neural network classification of agricultural land using multi-temporal Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite data. It is proposed to improve existing information technology by combining temporal attention for adaptive aggregation of multi-temporal observations with a spatial transform module that models global spatial dependencies in feature maps.

The existing information technology involves a neural network with the U-Net architecture and the EfficientNetV2-L encoder, pre-trained on the ImageNet-21k dataset, that uses attention mechanisms to aggregate temporal features when processing multispectral and radar images.

The paper considers several options for integrating temporal and spatial attention: sequential schemes (with the transformer placed before or after the temporal aggregation mechanism) and parallel schemes with different feature-combination methods (concatenation with 1×1 projection, gated additive merging, and weighted summation). Experimental studies were conducted on a sample comprising more than 90,000 land plots in the Berlin-Brandenburg region (Germany), divided into arable and non-arable lands, ensuring the representativeness of the results. The results indicate that using a spatial transformer does not always increase classification accuracy. The best results were achieved with a transformer placed before the temporal attention mechanism, whereas other integration schemes showed a decrease



© Д. Д. Чумичов, 2026

Стаття поширюється на умовах відкритої ліцензії CC BY 4.0

in quality. This indicates the need for appropriate and context-based use of transformer mechanisms in agricultural land classification tasks, where local textural and spectral features dominate.

Key words: High-resolution optical satellite images, Sentinel, classification of agricultural lands, deep learning, neural network, transformer, attention pooling, spatial attention.

Постановка проблеми

Задача класифікації сільськогосподарських угідь за даними дистанційного зондування Землі є складною через високу просторову роздільність зображень, багатоспектральний характер сигналів та наявність багаточасових спостережень із нерівномірною інформативністю. Попри активне впровадження трансформерних архітектур у комп'ютерному зорі, питання приросту точності класифікації, стабільності навчання та обчислювальної доцільності їх застосування в аграрних задачах залишається відкритим. Зокрема, недостатньо досліджено, за яких умов просторові трансформери дійсно покращують результати класифікації, а коли їх застосування призводить до деградації якості через надмірну складність моделі або невідповідність індуктивних упереджень структурі даних. Тож, актуальним є дослідження впливу різних способів інтеграції трансформерних механізмів на точність класифікації сільськогосподарських угідь із використанням супутникових знімків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Застосування трансформерних підходів у задачах супутникової сегментації та класифікації останнім часом стало активною областю досліджень. У дослідженні [1] запропоновано трансформер-орієнтований фреймворк для семантичної сегментації віддалених знімків, що поєднує згорткові шари з self-attention для підвищення точності класифікації. Схожий підхід використано у роботі [2], де трансфер-навчання із ієрархічними трансформерами показує значне покращення точності сегментації землекористування, що підтверджує доцільність глобального контекстного моделювання. Для вирішення проблем багатомасштабної сегментації в аграрних регіонах. У статті [3] запропоновано нейронну мережу для виявлення сільськогосподарських угідь за знімками Landsat із використанням ефективного багатомасштабного поєднання ознак.

У роботі [4] показано, що комбінація CNN і трансформерних блоків може суттєво підвищити точність сегментації за рахунок покращення глобальних залежностей і локальних деталей. Автори дослідження [5] продемонстрували застосування механізмів уваги до сегментації сільськогосподарських культур із Sentinel-2, що підтверджує ефективність уваги у задачах агромоніторингу. Комплексний огляд останніх трендів у глибокому навчанні для просторово-часової інтеграції різнорідних даних подано у статті [6], де виділено важливість об'єднання інформації за допомогою механізмів уваги.

Особливу увагу зосереджено на стратегіях інтеграції ознак: у праці [7] представлено гібридну архітектуру, яка комбінує CNN і Transformer для побудови представлень із довготривалими залежностями та мультисенсорним вирівнюванням даних. Результати порівняння CNN і трансформерних моделей у сегментації сільськогосподарських угідь наведено у матеріалі [8], де Swin Transformer показав високу точність на рентабельних даних Sentinel-2.

Систематичний огляд з трансформерів у задачах дистанційного зондування проведено авторами статті [9], який узагальнює тенденції застосування self-attention у сегментації та класифікації, вказуючи як позитивні сторони – глобальне контекстне моделювання, так і виклики – підвищені вимоги до обчислювальних ресурсів.

Ці роботи підтверджують, що сучасні трансформерні архітектури та механізми уваги являють собою потужний інструмент для задач сегментації та класифікації супутникових даних.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є експериментальне дослідження впливу просторових трансформерних механізмів на точність у задачі нейромережевої класифікації сільськогосподарських угідь на основі мультимасштабних супутникових даних Sentinel.

Для досягнення поставленої мети поставлені та вирішені наступні задачі:

- інтегрувати просторовий трансформер у інформаційну систему нейромережевої класифікації космічних знімків для виявлення орних та неорних земельних ділянок;
- провести систематичне порівняння альтернативних варіантів об'єднання часових і просторових ознак на єдиному датасеті.

Викладення основного матеріалу дослідження

Технологія нейромережевої класифікації космічних знімків для виявлення неорних земельних ділянок описана у [10] та [11]. Однією з ключових особливостей цієї архітектури є використання механізмів уваги (attention), які дозволяють підсилювати релевантні часові ознаки, агрегація яких підвищує якість класифікації об'єктів на основі часових змін. Узагальнена схема алгоритму зображена на рисунку 1.

При створенні нейромережевої моделі використовуються модулі інтеграції часової інформації та механізми формування виразних просторових представлень на основі трансформерної архітектури. У задачах сегментації на багаточасових даних (наприклад, супутникові знімки з різних дат) ключовою проблемою є наявність

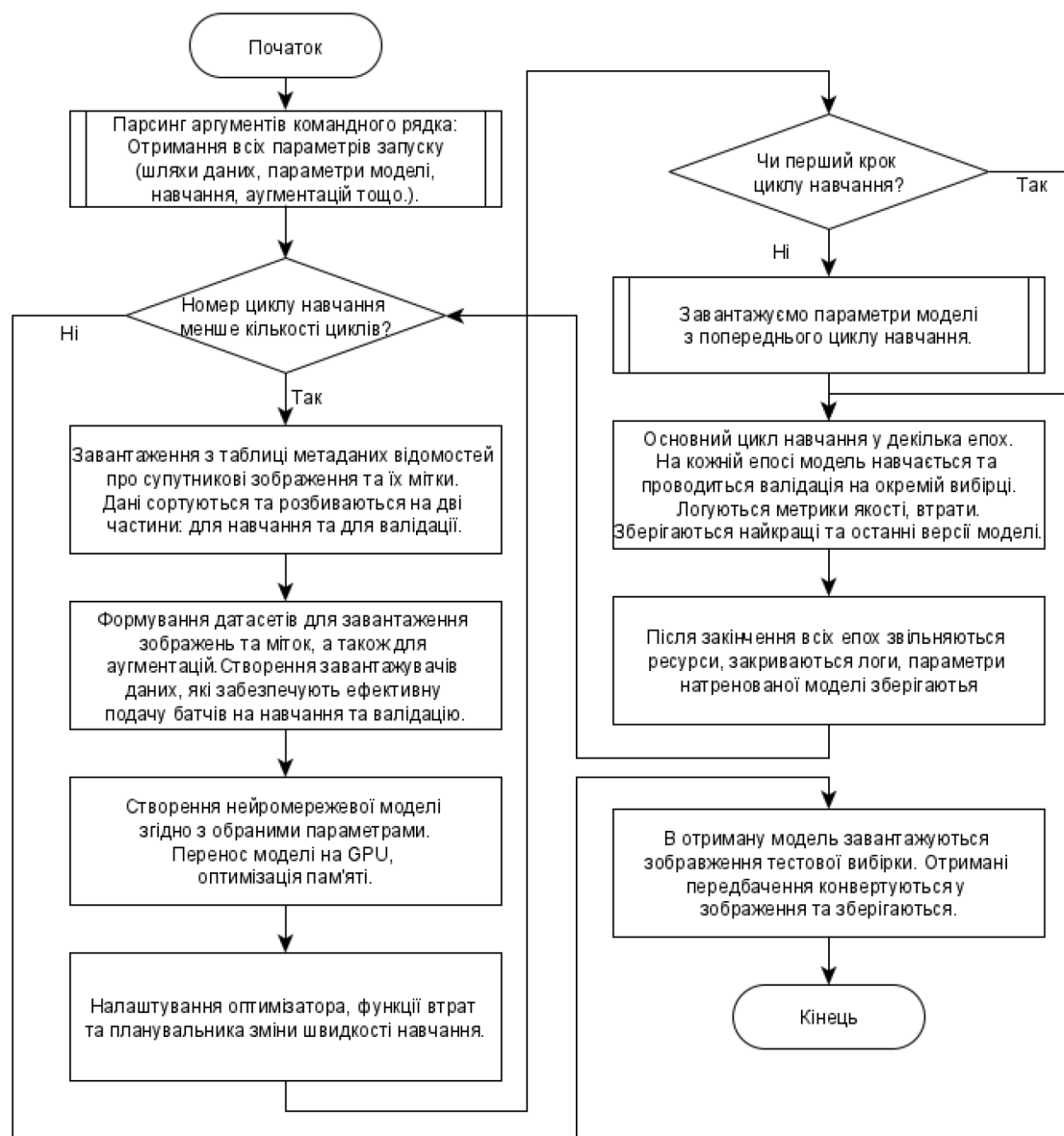


Рис. 1. Схема алгоритму нейромережевої класифікації сільгоспугідь з використанням знімків Sentinel-1 та Sentinel-2

нерівномірної інформативності часових кроків: окремі спостереження можуть містити хмари, сезонні артефакти або пропуски, тоді як інші – чітко відображають цільові об'єкти. Тому агрегування часових ознак простим усередненням або конкатенацією не завжди є оптимальним і може призводити до спотворення корисних сигналів.

Для адаптивної інтеграції багаточасових супутникових даних у роботі використано механізм часової уваги (Attention Pooling), який дозволяє моделі навчатися зважувати внесок окремих часових зрізів у підсумкове просторове представлення. Механізм уваги забезпечує селективне виділення інформативних спостережень і зменшення впливу зашумлених або частково відсутніх даних, що є типовим для мультиточасових супутникових серій.

На вхід модуля подається тензор ознак $X \in R^{B \times T \times C \times H \times W}$, де B – розмір батчу, T – кількість часових зрізів, $H = W = 256$ – просторові розміри, $C = 15$ – кількість каналів. Метою модуля є агрегація часової осі T в єдине просторове представлення $Y \in R^{B \times C \times H \times W}$ використовуючи увагу по часу окремо для кожної просторової позиції.

Для кожної просторової позиції $p = (i, j)$, де $i \in \{1..H\}$, $j \in \{1..W\}$ та об'єкта b обчислюється скалярний логіт уваги $a_{b,i,p}$ через невеликий багаточасовий перцептрон (MLP):

$$h_{b,i,p} = GELU(\text{LayerNorm}(W_1 x_{b,i,p} + b_1)), \quad a_{b,i,p} = W_2 h_{b,i,p} + b_2 \quad [12], \quad (1)$$

де $x_{b,i,p}$ – вхідний вектор ознак для конкретного часу і просторової позиції, $W_1 \in R^{H_d \times C}$, $b_1 \in R^{H_d}$ – ваги та зсув першого лінійного шару, $GELU$ – активаційна функція лінійної одиниці гаусової похибки, LayerNorm – нормалізація

шару MLP по вектору ознак розмірності H_d , $W_2 \in R^{1 \times H_d}$, $b_2 \in R$ – ваги та зсув другого лінійного шару, H_d – розмір прихованого шару MLP.

Далі обчислюються ваги уваги нормованою експоненційною функцією (softmax) по часовій осі для кожного b, p :

$$\alpha_{b,t,p} = \frac{\exp(a'_{b,t,p})}{\sum_{\tau=1}^T \exp(a'_{b,\tau,p})}, \quad \sum_{t=1}^T \alpha_{b,t,p} = 1 [13], \quad (2)$$

де, $\alpha_{b,t,p}$ – нормалізована вага уваги, яка визначає відносну значущість часової ознаки t для конкретної просторової позиції p та об'єкта b . Підсумкове представлення формується як зважена сума ознак по часовій осі:

$$y_{b,p} = \sum_{t=1}^T \alpha_{b,t,p} \cdot x_{b,t,p} [14], \quad (3)$$

де $x_{b,t,p} \in R^C$ – вектор ознак у момент часу t . Після цього підсумкові ознаки $y_{b,p}$ повертається у тензорний формат $Y \in R^{B \times D \times H \times W}$.

Для коректної роботи з нерегулярними часовими рядами додатково використовується маска валідності, яка виключає відсутні або непридатні спостереження з нормалізації softmax, забезпечуючи їх нульовий внесок у результат.

Для моделювання глобальних просторових взаємозв'язків у картах ознак застосовуються трансформери. Механізм self-attention дозволяє кожній просторовій позиції адаптивно інтегрувати інформацію з усього поля зору, формуючи контекстуалізовані представлення, що особливо важливо для узгодженої сегментації протяжних об'єктів і структур зі складною геометрією.

У модулі трансформера просторовий вимір $H \times W$ інтерпретується як послідовність токенів довжини $L = H \cdot W$, де кожен токен відповідає окремій просторовій позиції. Оскільки механізм self-attention є інваріантним до перестановок токенів, для збереження геометричної структури зображення до вхідних ознак явно вводиться позиційна інформація двома комплементарними способами.

По-перше, локальний просторовий контекст моделюється за допомогою згорткового позиційного кодування (Convolutional Positional Encoding, CPE), реалізованого як depthwise-згортка розміру 3×3 з подальшим резидуальним додаванням:

$$x' = x + DWConv_{3 \times 3}(x) \in R^{B \times C \times H \times W}, [15] \quad (4)$$

Такий підхід вводить локальну індуктивну упередженість, дозволяючи кожній позиції враховувати найближче оточення, не порушуючи семантику каналів і з мінімальними обчислювальними витратами.

По-друге, глобальна координатна структура задається фіксованим двовимірним синусно-косинусним позиційним кодуванням, яке додається до токенів після розгортання простору.

Отримана послідовність токенів подається на трансформерний енкодер, що складається з N однакових шарів. Ключовим компонентом кожного шару є багатоголова самоувага (Multi-Head Self-Attention, MHSA).

Для кожної пари токенів обчислюється скалярна міра схожості, нормалізована за допомогою softmax, що формує матрицю уваги:

$$A_h = softmax(S_h) \in R^{B \times L \times L}, \quad (5)$$

де $S_h \in R^{L \times L}$ – матриця попарних оцінок схожості між всіма просторовими позиціями (токенами) в голові уваги h , а оператор softmax застосовується по кожному рядку, формуючи нормалізовані ваги уваги.

Вихід кожної голови визначається як зважена сума значень, після чого результати всіх голів конкатенуються та проєктуються назад у простір розмірності C . Вихід MHSA інтегрується з вхідними ознаками через резидуальне з'єднання.

Другим компонентом шару є позиційно-інваріантна двошарова мережа прямого поширення (Feed-Forward Network, FFN) з нелінійністю GELU, яка незалежно обробляє ознаки кожного токена та також інтегрується за резидуальним принципом. Після проходження N шарів формується глобально контекстуалізована послідовність, яка згортається назад у просторову карту ознак $y \in R^{B \times C \times H \times W}$.

Таким чином, трансформерний модуль зберігає форму вхідного тензора, але кожна просторова позиція містить інформацію з усього поля зору.

У задачі сегментації за мультитимовими супутниковими спостереженнями вхідні дані подаються у вигляді послідовності зображень, отриманих у різні моменти часу. Після оброблення енкодером формується багаторівнева піраміда ознак, на рівні l якої маємо тензор $F^{(l)} \in R^{B \times T \times C_l \times H_l \times W_l}$, де B – розмір батча, T – кількість часових кроків, а (H_l, W_l) – просторові розміри карти ознак.

Метою інтеграції є отримання агрегованого просторового представлення $Y \in R^{B \times C_l \times H_l \times W_l}$, яке одночасно враховує часову динаміку спостережень і глобальний просторовий контекст. Залежно від порядку та способу їх поєднання розглядається кілька варіантів інтеграції:

1. Послідовний варіант А: AttentionPooling → SpatialTransformer

У цьому варіанті спочатку виконується часова агрегація, після чого просторовий трансформер застосовується до вже агрегованої карти:

$$P^{(l)} = \text{AttentionPooling}(F^{(l)}), \quad Y^{(l)} = \text{SpatialTransformer}(P^{(l)}). \quad (6)$$

Перевагою цього підходу є менша обчислювальна складність, оскільки трансформер працює лише з однією картою на батч. Недоліком є ризик втрати дрібних часових деталей до застосування просторової уваги.

2. Послідовний варіант В: SpatialTransformer → AttentionPooling

У даному варіанті просторовий трансформер застосовується до кожного часового кроку окремо, а часова агрегація виконується після цього:

$$\tilde{F}^{(l)} = \text{SpatialTransformer}(F^{(l)}), \quad Y^{(l)} = \text{AttentionPooling}(\tilde{F}^{(l)}). \quad (7)$$

Такий підхід краще зберігає просторову структуру перед агрегацією у часі, однак є дорожчим за обчислювальними ресурсами.

Далі розглядатимуться паралельні варіанти об'єднання. У паралельних схемах часова увага та просторовий трансформер обчислюються незалежно, після чого їх результати поєднуються на рівні ознак. Такий підхід дозволяє уникнути передчасної втрати інформації, оскільки ні часова агрегація, ні просторове моделювання не обмежують одна одну на етапі обчислення. Нехай $P^{(l)} \in R^{B \times C_l \times H_l \times W_l}$ – карта ознак, отримана механізмом часової уваги, а $Q^{(l)} \in R^{B \times C_l \times H_l \times W_l}$ – карта ознак після просторового трансформера. Розглядаються три способи їх об'єднання.

3. Конкатенація з подальшою 1×1 проєкцією (Concat + 1×1 conv)

Є найбільш прямолінійним способом інтеграції. У цьому випадку карти $P^{(l)}$ та $Q^{(l)}$ конкатенуються по каналному виміру, після чого застосовується лінійна проєкція у вигляді згортки 1×1 :

$$Y^{(l)} = \text{Conv}_{1 \times 1}([P^{(l)}, Q^{(l)}]) [16]. \quad (8)$$

Такий підхід забезпечує високу гнучкість комбінування ознак з обох гілок, однак через відмінності у статистиках і семантиці каналів часто призводить до нестабільності навчання та перенавчання.

4. Шлюзоване адитивне об'єднання (Gated-add fusion)

Ґрунтується на принципі залишкових з'єднань і розглядає часову агрегацію як базове представлення, яке може бути покращене просторовим трансформером лише за необхідності. У цьому випадку спочатку обчислюється просторово-каналний гейт:

$$G^{(l)} = \sigma(\text{Conv}_{1 \times 1}([P^{(l)}, Q^{(l)}])) [17], \quad (9)$$

після чого формується вихідна карта ознак:

$$Y^{(l)} = P^{(l)} + G^{(l)} \odot Q^{(l)} [17]. \quad (10)$$

Така схема зберігає базове представлення незмінним за відсутності корисного внеску просторового трансформера та забезпечує просторово-каналну адаптивність, що зазвичай підвищує стабільність навчання й узагальнювальну здатність порівняно з простою конкатенацією.

5. Зважене сумування з навчуваними коефіцієнтами (Weighted-sum fusion)

Є найбільш обмеженим і водночас найбільш стабільним способом інтеграції. У цьому випадку дві гілки змішуються через навчуваний коефіцієнт $\alpha^{(l)}$, спільний для всіх просторових позицій, але індивідуальний для кожного каналу:

$$\alpha^{(l)} = \sigma(\beta^{(l)}), \quad Y = (1 - \alpha^{(l)}) \odot P^{(l)} + \alpha \odot Q^{(l)} [18], \quad (11)$$

де $\beta^{(l)} \in R^{1 \times C_l \times 1 \times 1}$ – навчуваний параметр. Цей підхід озволяє канално оцінити відносну користь просторового трансформера за мінімальної кількості додаткових параметрів і високої стабільності навчання, однак не забезпечує просторової адаптивності, оскільки ваги злиття є сталими для всіх позицій.

Вплив запропонованих варіантів об'єднання механізму часової уваги та просторового трансформера на точність класифікації було перевірено експериментально на знімках супутників Sentinel. Вхідні супутникові зображення були отримані з відкритого сервісу Copernicus Browser [19] та поділені на окремі фрагменти фіксованого розміру 256×256 пікселів.

Для побудови навчальних та тестових масок використовувався відкритий векторний набір даних Field Boundaries for Agriculture (fiboa) [20]. Цей набір містить полігональні контури сільськогосподарських угідь разом з атрибутивною інформацією щодо типу землекористування. На основі аналізу атрибутів було відібрано ділянки, які є орними та не орними, після чого їхні векторні межі було перетворено у растрові маски.

У межах дослідження застосовано регіональний піднабір Field Boundaries for Berlin/Brandenburg (Germany), що охоплює близько 90 тис. офіційно зареєстрованих меж сільськогосподарських ділянок на території федеральних

земель Берлін і Бранденбург. З метою спрощення задачі класифікації всі категорії землекористування було агреговано у два узагальнені класи: орні та неорні угіддя (рис. 2).

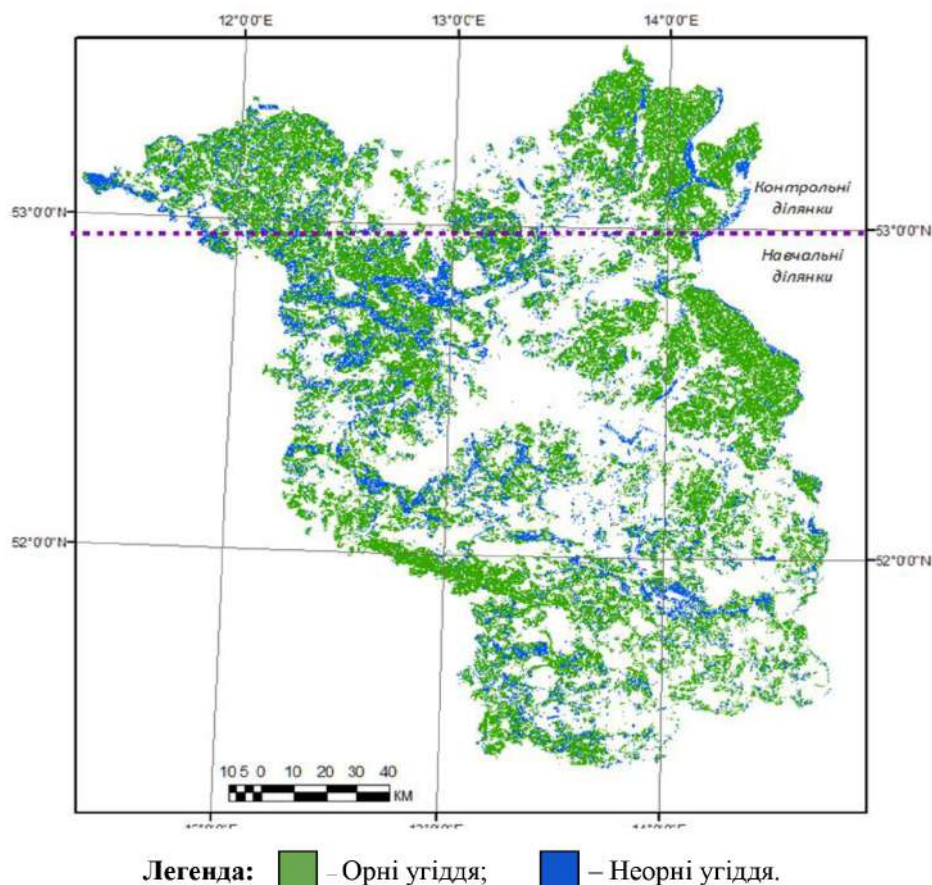


Рис. 2. Досліджувана територія федеральних земель Берлін та Бранденбург

Для аналізу впливу трансформерних компонентів у запропонованій архітектурі було проведено серію експериментів із використанням мультиспектральних і радарних даних Sentinel-2 та Sentinel-1 відповідно. Навчальний набір складався з 3690 тайлів, тоді як для валідації моделі використовувалися 922 зображення. Загалом у межах досліджуваної території було розглянуто 90 770 окремих земельних ділянок, з яких 43 736 відповідали класу неорних угідь. Для забезпечення просторово незалежної оцінки якості моделі приблизно 20 % ділянок, розташованих у північній частині регіону, було виділено в окремий тестовий набір, тоді як решта використовувалася для навчання.

На рисунку 3 наведено порівняльні приклади результатів роботи моделі з різними варіантами інтеграції трансформерних блоків: еталонні класифікаційні маски тестових зображень (а), прогнозні карти, отримані без використання трансформерів (б), з включенням трансформера після механізму часової уваги (в), з включенням трансформера перед механізмом часової уваги (г), а також при паралельному використанні трансформера та механізму часової уваги з різними способами об'єднання ознак – *concat_conv* (д), *gated_add* (е) та *weighted_sum* (є).

Для кількісної оцінки точності класифікації було використано 18154 тестові ділянки. Для кожної ділянки були отримані прогнозні маски, які порівнювалися з еталонними картами тестової вибірки. У разі якщо більш ніж 50 % пікселів в межах ділянки класифікувались правильно, то вся ця ділянка вважалась класифікованою правильно. Основні метрики точності класифікації ділянок з тестового набору у відсотках наведена у таблиці 1.

Отримані результати свідчать, що інтеграція трансформерного блоку в архітектуру моделі не завжди забезпечує підвищення точності класифікації порівняно з базовим варіантом без трансформера.

Найкращий результат (85,32 %) досягнуто у випадку включення трансформера перед механізмом часової уваги, що перевищує показник базової моделі (85,17 %). Використання трансформера після механізму уваги, а також паралельно з ним із різними схемами злиття ознак призводить до зниження точності класифікації. Це вказує на те, що в межах розглянутої архітектури трансформерні механізми у деяких випадках можуть ускладнювати процес навчання. Отримані результати підкреслюють доцільність зваженого застосування трансформерних архітектур у задачах оброблення супутникових знімків та необхідність їх адаптації до специфіки просторово-часових ознак даних дистанційного зондування.

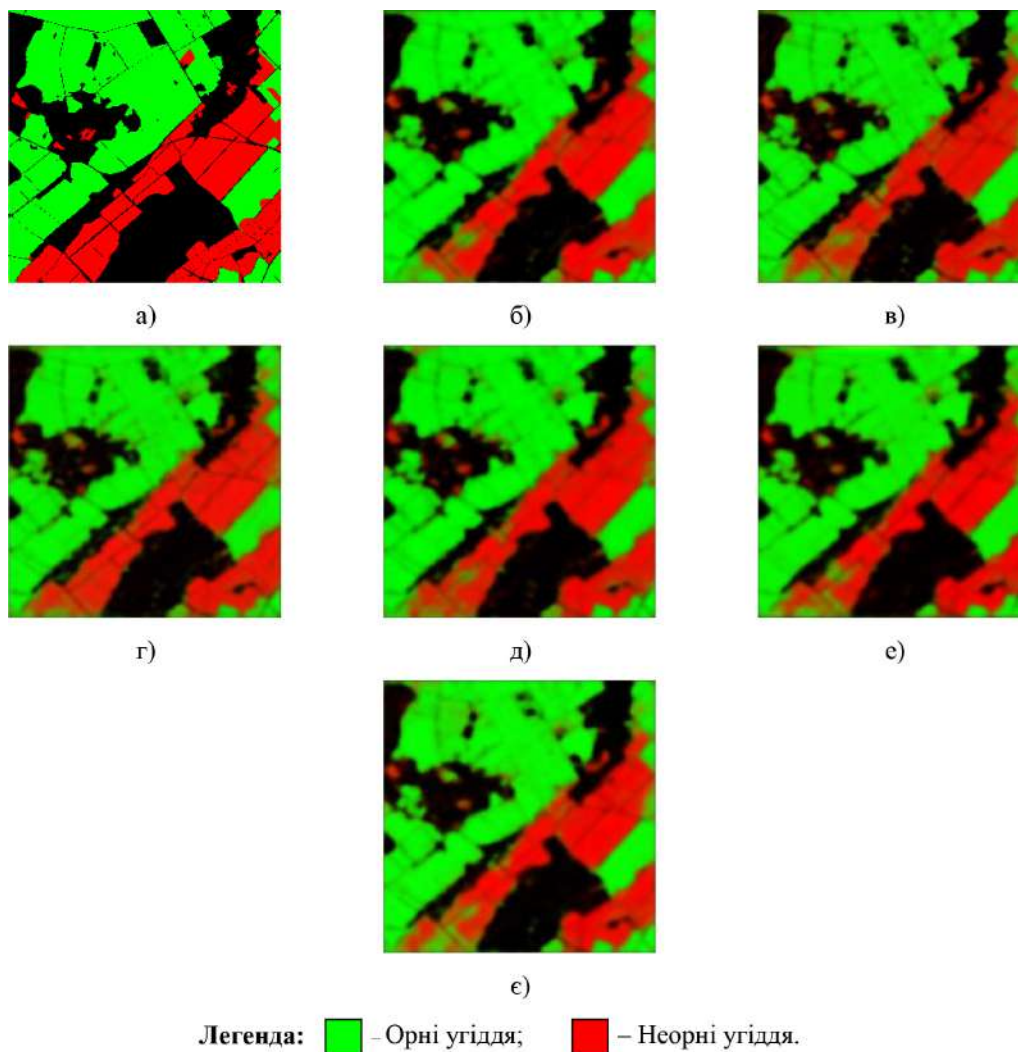


Рис. 3. Результати роботи моделі:

а – еталонна маска; б – без використання трансформера; в – трансформер до часової уваги; г – трансформер перед часовою увагою; д, е, є – паралельне об'єднання трансформера й часової уваги (concat_conv, gated_add, weighted_sum)

Таблиця 1

Метрики точності класифікації ділянок

Результат роботи моделі	Точність (Accuracy)	Прецизійність (Precision)	Чутливість (Recall)	F1-score	Специфічність (Specificity)
без трансформера	85.17	84.65	79.92	81.67	91.67
трансформер до часової уваги	85.32	84.65	80.30	81.95	91.81
трансформер після часової уваги	85.02	84.11	79.79	81.42	91.65
паралельне об'єднання (Concat + 1 × 1 conv)	84.87	84.51	79.45	81.28	91.48
паралельне об'єднання (Gated-add fusion)	84.81	83.96	79.60	81.24	91.53
паралельне об'єднання (Weighted-sum fusion)	84.07	82.40	79.22	80.50	91.23

Висновки

У роботі досліджено вплив просторових трансформерів на якість класифікації сільськогосподарських угідь за супутниковими знімками. Встановлено, що найкращий результат класифікації (85,32 %) досягається у випадку включення трансформерного блоку перед механізмом часової агрегації, що незначно, але стабільно перевищує показник базової моделі (85,17 %). Натомість застосування трансформера після часової уваги, а також його паралельне використання з різними схемами злиття ознак призводить до зниження точності, що свідчить про можливе ускладнення процесу навчання в межах розглянутої архітектури.

Обсяг експериментального матеріалу є достатнім для формування обґрунтованих висновків, оскільки оцінювання виконано на великій кількості незалежних земельних ділянок із просторовим розділенням навчальної та тестової вибірок, що мінімізує ризик просторового витоку інформації та підвищує надійність отриманих результатів.

Погіршення результатів при використанні механізмів просторової уваги у низці конфігурацій пояснюється тим, що для сільськогосподарських угідь визначальними є локальні спектрально-текстурні ознаки та сезонна динаміка, тоді як глобальні просторові залежності часто є слабо вираженими або надлишковими. За таких умов трансформерні механізми можуть моделювати неінформативні далекі взаємозв'язки, що призводить до внесення шуму в представлення ознак. Отримані результати підтверджують, що просторові трансформери не є універсальним засобом підвищення якості класифікації супутникових знімків і потребують зваженого застосування.

Список використаної літератури

1. Boulila W., et al. A transformer-based approach empowered by self-attention for semantic segmentation in remote sensing. *Heliyon*. 2024. № 10(8). e29396. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29396>
2. Chen M., Li L. Hierarchical transfer learning with transformers to improve semantic segmentation in remote sensing land use. *Remote Sensing*. 2025. № 17(2). 290. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs17020290>
3. Chen H., He G., Peng X., Wang G., Yin R. A multi-scale feature fusion deep learning network for the extraction of cropland based on Landsat data. *Remote Sensing*. 2024. № 16(21). 4071. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16214071>
4. Chen X., Li D., Liu M., Jia J. CNN and transformer fusion for remote sensing image semantic segmentation. *Remote Sensing*. 2023. № 15(18). 4455. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15184455>
5. Gao M., Lu T., Wang L. Crop mapping based on Sentinel-2 images using semantic segmentation model of attention mechanism. *Sensors*. 2023. № 23(15). 7008. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23157008>
6. Lian Z., Zhan Y., Zhang W., Wang Z., Liu W., Huang X. Recent advances in deep learning-based spatiotemporal fusion methods for remote sensing images. *Sensors*. 2025. № 25(4). 1093. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25041093>
7. Gong Y., Chen C., Zheng Y. Hybrid deep learning model for multi-source remote sensing data fusion: integrating DenseNet and Swin Transformer for spatial alignment and feature extraction. *Informatica*. 2025. № 49(24). DOI: <https://doi.org/10.31449/inf.v49i24.8395>
8. Xu H., Song J., Zhu Y. Evaluation and comparison of semantic segmentation networks for rice identification based on Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*. 2023. № 15(6). 1499. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15061499>
9. Wang R., Ma L., He G., Johnson B. A., Yan Z., Chang M., Liang Y. Transformers for remote sensing: a systematic review and analysis. *Sensors*. 2024. № 24(11). 3495. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24113495>
10. Чумичов Д., Нікулін С. Технологія нейромережевої класифікації космічних знімків для виявлення неорних земельних ділянок. *Електротехнічні та інформаційні системи*. 2025. № 108. С. 114–127. DOI: <https://doi.org/10.32782/EIS/2025-108-15>
11. Чумичов Д., Нікулін С. Використання контурів об'єктів супутникових знімків Sentinel для класифікації сільськогосподарських земель за допомогою нейронних мереж. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2025. № 61. С. 213–226. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-30>
12. Safari P., India M., Hernando J. Self-attention networks in speaker recognition. *Applied Sciences*. 2023. № 13(11). 6410. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13116410>
13. Slimani N., Jdey I., Kherallah M. Improvement of satellite image classification using attention-based vision transformer. *Proceedings of the 16th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*. 2024. С. 80–87. DOI: <https://doi.org/10.5220/0012298400003636>
14. Gackstetter D., Yu K., Körner M. Self-attention and frequency-augmentation for unsupervised domain adaptation in satellite image-based time series classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2025. № 224. С. 113–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.03.024>
15. Gao Y., Jiang X., Li Z., Song X., Li W. M3LNet: multi-frequency multi-scale multi-modal learning for multisource image classification. *Proceedings of the 2nd Asia Symposium on Image and Graphics*. 2025. С. 85–91. DOI: <https://doi.org/10.1145/3718441.3718454>
16. Liu Y., Guo Y., Georgiou T., et al. Fusion that matters: convolutional fusion networks for visual recognition. *Multimedia Tools and Applications*. 2018. № 77. С. 29407–29434. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-018-5691-4>
17. Fan Y., Niu L., Liu T. Multi-branch gated fusion network for image quality improvement in maritime perception systems. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. № 10(12). 1839. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10121839>
18. Yuan J., Shi Z., Chen S. Feature fusion in deep-learning semantic image segmentation: a survey. *Science and Technologies for Smart Cities*. Cham : Springer, 2022. С. 261–276. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06371-8_18
19. Copernicus Browser [Електронний ресурс]. URL: <https://browser.dataspace.copernicus.eu> (дата звернення: 28.11.2025)
20. Field Boundaries for Agriculture (fiboa) [Електронний ресурс]. URL: <https://fiboa.org> (дата звернення: 30.11.2025)

References

1. Boulila, W., et al. (2024). A transformer-based approach empowered by self-attention for semantic segmentation in remote sensing. *Heliyon*, 10(8), e29396. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29396>
2. Chen, M., & Li, L. (2025). Hierarchical Transfer Learning with Transformers to Improve Semantic Segmentation in Remote Sensing Land Use. *Remote Sensing*, 17(2), 290. <https://doi.org/10.3390/rs17020290>
3. Chen, H., He, G., Peng, X., Wang, G., & Yin, R. (2024). A Multi-Scale Feature Fusion Deep Learning Network for the Extraction of Cropland Based on Landsat Data. *Remote Sensing*, 16(21), 4071. <https://doi.org/10.3390/rs16214071>
4. Chen, X., Li, D., Liu, M., & Jia, J. (2023). CNN and Transformer Fusion for Remote Sensing Image Semantic Segmentation. *Remote Sensing*, 15(18), 4455. <https://doi.org/10.3390/rs15184455>
5. Gao, M., Lu, T., & Wang, L. (2023). Crop Mapping Based on Sentinel-2 Images Using Semantic Segmentation Model of Attention Mechanism. *Sensors*, 23(15), 7008. <https://doi.org/10.3390/s23157008>
6. Lian, Z., Zhan, Y., Zhang, W., Wang, Z., Liu, W., & Huang, X. (2025). Recent Advances in Deep Learning-Based Spatiotemporal Fusion Methods for Remote Sensing Images. *Sensors*, 25(4), 1093. <https://doi.org/10.3390/s25041093>
7. Gong, Y., Chen, C., & Zheng, Y. (2025). Hybrid Deep Learning Model for Multi-Source Remote Sensing Data Fusion: Integrating DenseNet and Swin Transformer for Spatial Alignment and Feature Extraction. *Informatica*, 49(24). <https://doi.org/10.31449/inf.v49i24.8395>
8. Xu, H., Song, J., & Zhu, Y. (2023). Evaluation and Comparison of Semantic Segmentation Networks for Rice Identification Based on Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*, 15(6), 1499. <https://doi.org/10.3390/rs15061499>
9. Wang, R., Ma, L., He, G., Johnson, B. A., Yan, Z., Chang, M., & Liang, Y. (2024). Transformers for Remote Sensing: A Systematic Review and Analysis. *Sensors*, 24(11), 3495. <https://doi.org/10.3390/s24113495>
10. Chumychev, D., & Nikulin, S. (2025). Neural network classification technology of space images to identify non-arable land plots. *Electrical and Information Systems*, (108), pp. 114–127. <https://doi.org/10.32782/EIS/2025-108-15>
11. Chumychev, D., & Nikulin, S. (2025). Using contours of objects from Sentinel satellite images for classifying agricultural lands using neural networks. *Computer-integrated technologies: education, science, production*, (61), pp. 213–226. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-30>
12. Safari, P., India, M., & Hernando, J. (2023). Self Attention Networks in Speaker Recognition. *Applied Sciences*, 13(11), 6410. <https://doi.org/10.3390/app13116410>
13. Slimani, N., Jdey, I. & Kherallah, M. (2024). Improvement of Satellite Image Classification Using Attention-Based Vision Transformer. In *Proceedings of the 16th International Conference on Agents and Artificial Intelligence – Volume 3: ICAART*; ISBN 978-989-758-680-4; ISSN 2184-433X, SciTePress, pp. 80–87. <https://doi.org/10.5220/0012298400003636>
14. Gackstetter, D., Yu, K., Körner, M. (2025) Self-attention and frequency-augmentation for unsupervised domain adaptation in satellite image-based time series classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 224, pp. 113–132. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.03.024>
15. Gao, Y., Jiang, X., Li, Z., Song, X., & Li, W. (2025) M3LNet: Multi-frequency Multi-scale Multi-modal Learning for Multisource Image Classification. In *Proceedings of the 2024 2nd Asia Symposium on Image and Graphics (ASIG '24)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 85–91. <https://doi.org/10.1145/3718441.3718454>
16. Liu, Y., Guo, Y., Georgiou, T., et al. (2018) Fusion that matters: convolutional fusion networks for visual recognition. *Multimed Tools Appl*, 77, pp. 29407–29434. <https://doi.org/10.1007/s11042-018-5691-4>
17. Fan, Y., Niu, L., & Liu, T. (2022). Multi-Branch Gated Fusion Network: A Method That Provides Higher-Quality Images for the USV Perception System in Maritime Hazy Condition. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12), 1839. <https://doi.org/10.3390/jmse10121839>
18. Yuan, J., Shi, Z., & Chen, S. (2022). Feature Fusion in Deep-Learning Semantic Image Segmentation: A Survey. In: Paiva, S., et al. *Science and Technologies for Smart Cities. SmartCity 360 2021. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, 442. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06371-8_18
19. Copernicus Browser. (n.d.). Retrieved November 28, 2025, from: <https://browser.dataspace.copernicus.eu>
20. Field Boundaries for Agriculture (fiboa). (n.d.). Retrieved November 30, 2025, from: <https://fiboa.org>

Дата першого надходження статті до видання: 21.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

І. О. ШАКЛЕІНА

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри інформаційних систем та мереж
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0003-0809-1480

А. Т. САВШАК

магістр кафедри фізики та інформаційних систем
Дрогобицький державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0009-0007-5769-3898

О. Т. ШАКЛЕІН

магістр кафедри інформаційних систем та мереж
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0009-0001-0025-2166

МЕТОД ЗНИЖЕННЯ ХИБНИХ СПРАЦЮВАНЬ У СИСТЕМАХ ВІЯВЛЕННЯ ВТОРГНЕНЬ НА ОСНОВІ ПОРОГОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ТА GRADIENT BOOSTING

Зростання кількості та складності кіберзагроз зумовлює необхідність підвищення ефективності систем виявлення вторгнень. Практичне використання таких систем суттєво ускладнюється високим рівнем хибних спрацювань, який призводить до перевантаження фахівців з безпеки. Метою роботи є розробка методу зниження хибних спрацювань у системах виявлення мережеских вторгнень, що забезпечує оптимальний баланс між точністю класифікації, обчислювальною ефективністю та практичною придатністю для розгортання у реальних мережеских середовищах. Запропонований метод базується на поєднанні алгоритму градієнтного бустингу LightGBM із механізмом адаптивної порогової фільтрації з fallback-класом. В роботі розроблено мікросервісну архітектуру системи на базі контейнеризації Docker, яка включає п'ять основних компонентів: CICFlowMeter для формування потоків, Converter для конвертації форматів, Agent для батчування подій, API Server для класифікації та Dashboard для візуалізації результатів. Ключовою науковою новизною є алгоритм адаптивної порогової фільтрації, що використовує індивідуальні порогові значення для кожного класу атак та механізм автоматичного повернення до класу BENIGN у разі недостатньої впевненості моделі.

Експериментальні дослідження, виконані на публічному датасеті CIC-IDS2017, показали що запропонований метод забезпечує точність класифікації на рівні F1-score = 0.949 при рівні хибних спрацювань 2.1 %, що становить зниження на 74 % порівняно з базовою моделлю LightGBM без постобробки. У порівнянні з багатошаровою нейронною мережею MLP запропоноване рішення забезпечує вищу точність при чотириразовому скороченні часу навчання та майже вдвічі швидшому інференсі. Також досліджено внесок кожного компонента запропонованої системи у точність виявлення кібератак. Результати тестування на різних типах атак показали найкращу ефективність виявлення для DDoS, PortScan та DoS-атак. Практична значущість роботи полягає у можливості застосування запропонованого методу в реальних системах виявлення вторгнень без потреби у графічних пристроях, що робить його придатним для організацій з обмеженими обчислювальними ресурсами.

Ключові слова: виявлення вторгнень, машинне навчання, кібератаки, мережева безпека, хибні спрацювання, порогова фільтрація.

І. О. SHAKLEINA

Ph.D. (Physical and Mathematical Sciences), Associate Professor,
Associate Professor at the Information Systems and Networks Department
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0003-0809-1480

А. Т. SAVSHAK

Master's Student at the Department of Physics and Information Systems
Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University
ORCID: 0009-0007-5769-3898



О. Т. SHAKLEIN

Master's Student at the Department of Information Systems and Networks

Lviv Polytechnic National University

ORCID: 0009-0001-0025-2166

METHOD FOR REDUCING FALSE ACCOUNTS IN INTRUDER DETECTION SYSTEMS BASED ON THRESHOLD FILTERING AND GRADIENT BOOSTING

The increasing number and complexity of cyber threats necessitates the need to improve the efficiency of intrusion detection systems. The practical use of such systems is significantly complicated by the high level of false positives, which leads to an overload of security professionals. The aim of the work is to develop a method for reducing false positives in network intrusion detection systems that provides an optimal balance among classification accuracy, computational efficiency, and practical suitability for deployment in real network environments. The proposed method combines the LightGBM gradient boosting algorithm with an adaptive threshold filtering mechanism and a fallback class. A microservice architecture for the system based on Docker containerization has been developed, comprising five main components: CICFlowMeter for flow generation, Converter for format conversion, Agent for event batching, API Server for classification, and Dashboard for results visualization. The key scientific novelty is the adaptive threshold filtering algorithm, which uses individual threshold values for each attack class and a mechanism for automatically returning to the BENIGN class when model confidence is insufficient.

Experimental studies on the public CIC-IDS2017 dataset showed that the proposed method achieves an F1-score = 0.949 and a false positive rate of 2.1 %, a 74 % reduction compared to the basic LightGBM model without post-processing. Compared to the MLP multilayer neural network, the proposed solution achieves higher accuracy with a fourfold reduction in training time and inference that is almost twice as fast. The contribution of each component of the proposed system to the accuracy of cyberattack detection was also investigated. Testing across different attack types showed the best detection efficiency for DDoS, PortScan, and DoS attacks. The practical significance of the work lies in the ability to apply the proposed method in real intrusion detection systems without the need for graphics accelerators, making it suitable for organizations with limited computing resources.

Key words: intrusion detection, machine learning, cyberattacks, network security, false positives, threshold filtering.

Постановка проблеми

В умовах зростання кількості та складності кіберзагроз важливим є вдосконалення методів захисту інформаційних систем. За даними аналітичних звітів з кібербезпеки, у 2024 році кількість кібератак на одну організацію зросла більш ніж на 70 % у порівнянні з попереднім роком, при цьому середня кількість атак сягала понад 1 800 інцидентів на тиждень [1]. У 2025 році ця тенденція зберігається, що підтверджується зростанням кількості складних багатовекторних атак, зокрема ransomware та атак нульового дня.

У таких умовах системи виявлення вторгнень (Intrusion Detection Systems, IDS) залишаються одним із ключових інструментів забезпечення кібербезпеки корпоративних мереж [2]. Водночас їх практичне використання суттєво ускладнюється високим рівнем хибних спрацювань (False Positive Rate, FPR) [3]. Особливо гостро ця проблема проявляється у високонавантажених мережах, де навіть незначне зростання FPR суттєво впливає на ефективність моніторингу безпеки.

У сучасних умовах зростання кіберзагроз існує два основних підходи до побудови систем виявлення вторгнень: використання складних моделей глибинного навчання, які демонструють високу точність, але потребують значних обчислювальних ресурсів [4], та практичні рішення на основі класичних методів машинного навчання, здатні працювати в режимі реального часу на обмежених апаратних ресурсах.

Deep learning підходи забезпечують високу точність виявлення атак, однак мають низку суттєвих обмежень, зокрема потребу у GPU для інференсу, складність інтерпретації результатів, підвищений рівень хибних спрацювань без додаткової пост-обробки та відсутність готових production-рішень для високонавантажених мереж. У зв'язку з цим актуальним є використання класичних моделей машинного навчання з додатковими механізмами зниження FPR.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Традиційні сигнатурні системи виявлення вторгнень, такі як Snort, забезпечують високу швидкодію та низький рівень хибних спрацювань для відомих типів атак. Однак, попри свою зрілість та велику базу правил, Snort демонструє обмежену ефективність при роботі з високонавантаженим трафіком через однопотокову архітектуру [5]. Останніми роками значного поширення набули підходи на основі глибинного навчання (Deep Learning). У роботі В. В. Бандури, М. В. Крихівського та В. І. Чудик [4] запропоновано комплексну модель прогнозування кібератак на основі алгоритмів штучного інтелекту для виявлення аномалій, орієнтовану на аналіз великих обсягів мережевих даних. Запропонована модель поєднує рекурентні нейронні мережі (RNN), двонаправлені рекурентні мережі (Bi-RNN), згорткові нейронні мережі (CNN), механізм уваги та трансформерні архітектури, що дозволяє ефективно аналізувати як часові, так і просторові залежності у мережевому трафіку.

Подібний підхід із використанням гібридної моделі CapsNet + BiLSTM описано у роботі [6], де автори досягли точності 99 % на датасеті CIC-IDS2017. Проблема зниження FPR активно досліджується у науковій літературі. В роботі [7] описано застосування адаптивних алгоритмів машинного навчання з online learning для динамічного налаштування порогів виявлення, що дало змогу знизити FPR на 30–40 % порівняно зі статичними моделями. Дослідження показують, що методи порогової фільтрації є ефективним інструментом для зниження кількості хибних спрацювань без суттєвого погіршення показників виявлення справжніх атак [8].

Deep learning підходи залишаються обмежено придатними для практичного використання через високі вимоги до ресурсів та складність інтерпретації [9]. Таким чином, актуальною є необхідність пошуку менш ресурсомістких і більш інтерпретованих рішень, здатних забезпечити подібну ефективність.

Для побудови IDS на стандартних наборах даних широко застосовуються класичні методи машинного навчання. Дослідження [10] показують, що ці методи забезпечують прийнятну точність і зручність інтерпретації при роботі з датасетом CIC-IDS2017 [11], досягаючи F1-score на рівні 0.94–0.96, однак часто супроводжуються підвищеним рівнем FPR (6–9 %), що негативно впливає на їх практичну ефективність. У роботі [12] проведено комплексне порівняння різних алгоритмів машинного навчання на датасеті CIC-IDS2017, де показано, що вибір методу значною мірою залежить від специфіки мережевого середовища та вимог до балансу між точністю та продуктивністю.

Перспективним напрямом є використання методів градієнтного бустингу, зокрема LightGBM. Порівняльні дослідження демонструють, що ці моделі забезпечують кращий баланс між точністю класифікації та обчислювальною складністю, а також перевершують класичні ML-алгоритми за показниками якості виявлення атак. У роботі [13] запропоновано AutoML-підхід на основі gradient boosting для виявлення мережових вторгнень, який показав високу ефективність на датасеті CIC-IDS2017 з F1-score 0.95–0.97 та часом інференсу 3–5 мс на подію. Разом із тим, навіть для Gradient Boosting-моделей проблема зниження рівня хибних спрацювань залишається актуальною, що особливо критично для багатокласових моделей у високонавантажених мережах.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є розробка методу зниження хибних спрацювань у системах виявлення мережових вторгнень, що забезпечує оптимальний баланс між точністю класифікації, обчислювальною ефективністю та практичною придатністю для розгортання у реальних мережових середовищах шляхом поєднання gradient boosting моделі LightGBM із механізмом адаптивної порогової фільтрації з fallback-класом.

Викладення основного матеріалу дослідження

В роботі запропоновано метод зниження хибних спрацювань у системах виявлення мережових вторгнень. Метод реалізовано у вигляді мікросервісної архітектури на базі контейнеризації Docker, що забезпечує модульність, масштабованість та простоту розгортання. Система охоплює повний цикл обробки мережевого трафіку – від захоплення пакетів до формування сповіщень про виявлені загрози та включає п'ять основних компонентів:

- CICFlowMeter – сервіс перетворення PCAP-файлів у CSV-формат потоків із 83 статистичними ознаками;
- Converter – модуль конвертації CSV-потоків у формат NDJSON із фільтрацією за напрямком трафіку (локальний/вхідний);
- Agent – файловий агент, що формує батчі подій і надсилає їх на сервіс інференсу через HTTP API;
- API (FastAPI) – центральний сервіс, що виконує препроцесинг, класифікацію за допомогою LightGBM, порогову фільтрацію результатів та журналювання детекцій у форматі Parquet;
- Dashboard – веб-інтерфейс для візуалізації статистики виявлених загроз, перегляду останніх алертів та моніторингу стану системи.

Взаємодія між компонентами здійснюється через HTTP-запити та спільні директорії для проміжних даних, що забезпечує слабку зв'язаність компонентів і можливість незалежного масштабування. Центральний сервіс API забезпечує повний цикл обробки подій: отримання даних, передобробка ознак (імпутація та масштабування), інференс моделі LightGBM, застосування порогової фільтрації з fallback-механізмом та формування відповіді у форматі JSON.

На рис. 1 наведено діаграму послідовностей, що ілюструє процес взаємодії основних компонентів системи виявлення вторгнень під час обробки мережевого трафіку. Для збору первинних даних використано інструмент Dumpcap, який і забезпечує високопродуктивне захоплення мережових пакетів у режимі реального часу з мінімальними накладними витратами на систему. Отримані дампи трафіку зберігаються у форматі PCAP та використовуються як вхідні дані для подальшої обробки. Використання CICFlowMeter дозволяє отримати стандартизований набір ознак, що широко застосовується у сучасних дослідженнях IDS і забезпечує порівнюваність результатів з іншими роботами.

На етапі препроцесингу виконано усунення пропущених значень та нормалізацію ознак. Етап попередньої обробки включає два послідовні кроки:

- а) імпутація відсутніх значень (SimpleImputer з медіанною стратегією). Використання медіанної стратегії забезпечує стійкість до викидів та зберігає статистичні властивості розподілу даних.
- б) стандартизація ознак (StandardScaler). Оскільки ознаки мають різні діапазони значень (від бінарних прапорців до великих цілих чисел), стандартизація забезпечує однакову вагу всіх ознак при навчанні моделі та

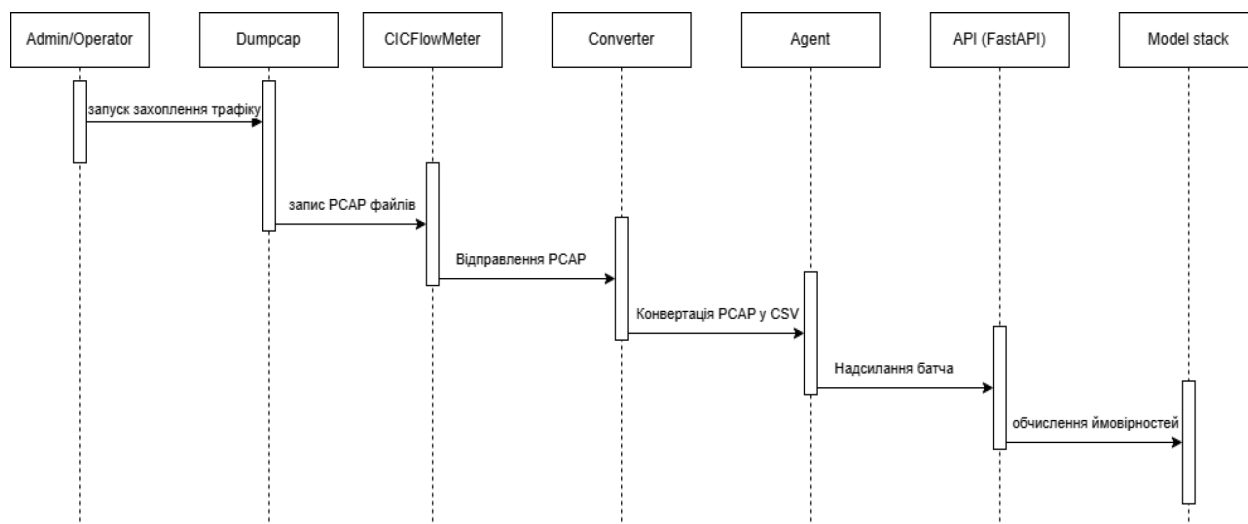


Рис. 1. Процес обробки мережевого трафіку в системі виявлення вторгнень

прискорює збіжність алгоритму градієнтного бустингу. Такий підхід покращує збіжність моделей машинного навчання та підвищує стабільність результатів класифікації.

Для класифікації мережових потоків використано модель Light Gradient Boosting Machine (LightGBM) з наступними параметрами:

- num_leaves: 31 (кількість листків у дереві)
- max_depth: -1 (необмежена глибина дерева)
- learning_rate: 0.1 (швидкість навчання)
- n_estimators: 100 (кількість дерев)
- objective: 'multiclass' (багатокласова класифікація)

Ключовою інновацією запропонованого методу є алгоритм адаптивної порогової фільтрації результатів багатокласової класифікації, що застосовується на виході моделі LightGBM. На першому етапі для кожного мережевого потоку модель LightGBM формує вектор ймовірностей $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, де p_i відповідає ймовірності належності потоку до i -го класу атак або класу BENIGN. На відміну від традиційного підходу, де фінальний клас визначається як $\arg \max(P)$, у запропонованому методі використовується набір індивідуальних порогових значень $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, які задають мінімальний рівень впевненості для кожного класу атак.

Алгоритм порогової фільтрації побудований за наступною логікою:

1. Для кожного класу перевіряється умова $p_i \geq t_i$.
2. Формується множина кандидатів, що задовольняють свої порогові значення.
3. Якщо множина кандидатів порожня, потік класифікується як BENIGN (fallback-механізм).
4. Якщо кандидатів декілька, фінальний клас визначається як той, що має максимальну ймовірність серед кандидатів.

Додатково застосовується фільтрація за напрямком трафіку, що дозволяє виключити зовнішній трафік, який не становить безпосередньої загрози внутрішній мережі, та суттєво зменшити кількість хибних спрацювань.

Запропонований алгоритм дозволяє отримати зниження FPR через fallback-механізм; адаптивно налаштовувати чутливість IDS без перенавчання моделі; зберегти високу точність виявлення атак при мінімальних обчислювальних витратах. Зміна порогового значення дозволяє суттєво зменшити кількість хибнопозитивних спрацювань, не погіршуючи при цьому здатність системи виявляти реальні атаки. Таким чином, порогова фільтрація виконує роль механізму пост-обробки, який підвищує практичну придатність IDS.

Для навчання та тестування системи використано публічний датасет CIC-IDS2017, розроблений Канадським інститутом кібербезпеки (Canadian Institute for Cybersecurity) [11, 13]. Дані розподілено у співвідношенні 80:20 для навчання та тестування відповідно. Для забезпечення репрезентативності обох вибірок використано стратифікований розподіл (stratified split), що зберігає пропорції класів у навчальній та тестовій вибірках.

Для оцінки ефективності запропонованого підходу виконано порівняльний аналіз моделі LightGBM з багатоваровою нейронною мережею MLP (Multi-Layer Perceptron) за наступними метриками: Precision, Recall, F1-Score; False Positive Rate (FPR); час навчання, час інференсу. Порівняльні характеристики моделей наведено в таблиці 1.

Час навчання та інференсу вимірювався на робочій станції з процесором Intel Core i7-10700 (8 cores, 2.9 GHz), 16 GB RAM, без використання GPU.

Результати показують, що LightGBM перевершує MLP за всіма метриками при значно нижчих обчислювальних витратах. Час навчання LightGBM у 4 рази менший, а час інференсу майже вдвічі швидший порівняно з MLP. Таким

Таблиця 1

Порівняльні характеристики моделей

Модель	Precision	Recall	F1-Score	FPR	час навчання	час інференсу
MLP	0.930	0.912	0.921	9.1 %	180 хв	5.2 мс
LightGBM	0.958	0.941	0.949	2.1 %	45 хв	3.1 мс

Таблиця 2

Вплив компонентів системи на точність виявлення кібератак

Конфігурація	Precision	Recall	F1-Score	FPR
Базова LightGBM	0.89	0.87	0.88	12.3 %
+ SimpleImputer	0.92	0.9	0.91	9.5 %
+ StandardScaler	0.94	0.92	0.93	8.2 %
+ Порогова фільтрація (0.7)	0.96	0.94	0.95	2.1 %

чином, LightGBM забезпечує порівнянну або вищу точність класифікації при значно нижчих обчислювальних витратах.

MLP-модель продемонструвала чутливість до параметрів навчання та більшу схильність до хибних спрацювань, особливо за умов дисбалансу класів. Натомість LightGBM у поєднанні з пороговою фільтрацією забезпечив стабільніше зниження FPR, що є критично важливим для реальних систем виявлення вторгнень. Вплив компонентів системи на точність виявлення наведено в таблиці 2.

Проведений аналіз показав, що кожен компонент запропонованої системи робить внесок у загальну якість класифікації. Формування потоків за допомогою CICFlowMeter забезпечує інформативний набір ознак, препроцесинг підвищує стабільність навчання моделей, а використання LightGBM дозволяє ефективно моделювати складні залежності у даних. Використання імпутації знижує FPR (з 12.3 % до 9.5 %), що підтверджує важливість коректної обробки відсутніх значень. Додавання масштабування дає додаткове зниження FPR та покращує F1-score.

Найбільший ефект досягається при застосуванні порогової фільтрації яка дозволяє адаптувати поведінку системи до вимог конкретного середовища експлуатації та значно підвищує практичну ефективність IDS. FPR знижується з 8.2 % до 2.1 %, при цьому F1-score зростає з 0.932 до 0.949 за рахунок підвищення точності (precision).

Також, в роботі було проведено тестування запропонованого методу для різних типів атак. Результати показують, що атаки DDoS виявляються найкраще ($F1 = 0.978$) завдяки чітким патернам великого обсягу трафіку. Атаки PortScan та DoS також добре розпізнаються ($F1 \approx 0.94-0.95$). Складніші атаки (Bot, Web Attack, Infiltration) мають нижчі показники ($F1 \approx 0.85-0.90$) через менш виражені статистичні патерни та малу кількість прикладів у навчальній вибірці.

Висновки

У статті запропоновано метод зниження хибних спрацювань у системах виявлення вторгнень на основі поєднання алгоритму LightGBM з механізмом адаптивної порогової фільтрації. У ході дослідження розроблено архітектуру IDS, яка охоплює повний цикл обробки мережевого трафіку: захоплення пакетів за допомогою Dumpcap, формування потоків і статистичних ознак із використанням CICFlowMeter, препроцесинг даних та багатокласову класифікацію на основі алгоритму LightGBM. Застосування стандартних методів препроцесингу дозволило підвищити стабільність навчання моделі та покращити узагальнюючу здатність класифікатора.

Ключовою новизною є алгоритм адаптивної порогової фільтрації з індивідуальними пороговими значеннями для кожного класу атак, механізмом fallback до класу BENIGN та фільтрацією за напрямком трафіку. Експериментальне тестування на датасеті CIC-IDS2017 (2.8 млн записів, 9 класів атак) показало зниження FPR з 8.2 % до 2.1 % (на 74 %) при $F1\text{-score} = 0.949$. Досліджено внесок кожного компонента: імпутація знижує FPR на 2.8 в.п., масштабування – на 1.3 в.п., порогова фільтрація – на 6.1 в.п. Порівняння з багатошаровою нейронною мережею MLP продемонструвало перевагу запропонованого методу: LightGBM з фільтрацією забезпечує вищу точність ($F1 = 0.949$ проти 0.921) при чотириразовому скороченні часу навчання (45 хв проти 180 хв) та майже вдвічі швидшому інференсі (3.1 мс проти 5.2 мс). Отримані результати свідчать, що поєднання класичних моделей машинного навчання з ефективними механізмами пост-обробки є перспективним напрямом побудови практичних IDS, здатних працювати в режимі реального часу. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на автоматичну оптимізацію порогових значень, адаптацію методу до нових типів атак та інтеграцію запропонованого підходу у промислові системи кібербезпеки.

Список використаної літератури

1. Keepnet Labs. Cybersecurity Statistics 2024: Updated Trends and Data. URL: <https://keepnetlabs.com/blog/171-cyber-security-statistics-2024-s-updated-trends-and-data>
2. Ferrag M. A., Maglaras L. A (2024) Comprehensive Review of Intrusion Detection Systems Using Machine Learning. *SN Computer Science*. Vol. 5, № 6. <https://doi.org/10.1007/s42979-024-03369-0>
3. Corelight. Reducing IDS False Positives. 2025. URL: <https://corelight.com/resources/glossary/ids-false-positives>

4. Бандура В. В., Крихівський М. В., Чудик В. І. (2025) Прогнозування кібератак за допомогою алгоритмів штучного інтелекту виявлення аномалій. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Т. 1 (92), № 2. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.2>
5. Ahmad W. et al. (2024) Comparative Analysis of Architectural Differences: Snort vs. Suricata. *Iraqi Journal for Computer Science and Mathematics*. Vol. 7, Issue 2. URL: <https://www.ijict.edu.iq/index.php/ijict/article/download/290/122>
6. Khan Z. et al. (2025) Improving Intrusion Detection with Hybrid Deep Learning Models: A Study on CIC-IDS2017, UNSW-NB15, and KDD CUP 99. *Journal of Information Systems Engineering and Management*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/389144460>
7. Reducing False Positives in Intrusion Detection Systems with Adaptive Machine Learning Algorithms. ResearchGate. 2025. URL: <https://www.researchgate.net/publication/390747122>
8. Gupta N., Jain A. (2016) Reducing False Positive in Intrusion Detection System: A Survey. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*. Vol. 7, No. 3. P. 1600–1603.
9. Yakub Reddy K., ShankarLingam G. (2024) Artificial Intelligence in Intrusion Detection Systems: Trends, Frameworks, and Future Directions for Cybersecurity. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. Vol. 12, No. 21. URL: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/7689>
10. Almiani M. et al. (2024) Comparative Performance Evaluation of Machine Learning Algorithms for Cyber Intrusion Detection. *Preprints*. <https://doi.org/10.20944/preprints202412.0497.v1>
11. Canadian Institute for Cybersecurity. Intrusion Detection Evaluation Dataset (CIC-IDS2017). University of New Brunswick. 2017. URL: <https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2017.html>
12. Khan Z. I. et al. (2024) A Comprehensive Study on CIC-IDS2017 Dataset for Intrusion Detection Systems. ResearchGate. URL: <https://www.researchgate.net/publication/378709289>
13. Maseer Z. K. et al. (2021) Benchmarking of Machine Learning for Anomaly Based Intrusion Detection Systems in the CICIDS2017 Dataset. *IEEE Access*. Vol. 9. P. 22351–22370. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3056614

References

1. Keepnet Labs. Cybersecurity Statistics 2024: Updated Trends and Data. URL: <https://keepnetlabs.com/blog/171-cyber-security-statistics-2024-s-updated-trends-and-data>
2. Ferrag M. A., Maglaras L. A (2024) Comprehensive Review of Intrusion Detection Systems Using Machine Learning. *SN Computer Science*. Vol. 5, № 6. <https://doi.org/10.1007/s42979-024-03369-0>
3. Corelight. Reducing IDS False Positives. 2025. URL: <https://corelight.com/resources/glossary/ids-false-positives>
4. Bandura V. V., Krykhivskyi M. V., Chudyk V. I. (2025) Prohnozuvannia kiberatak za dopomohoiu alhorytmiv shtuchnoho intelektu vyavlennia anomalii. [Forecasting cyberattacks using artificial intelligence algorithms for anomaly detection.] *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. Vol. 1 (92), № 2. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.2> [in Ukrainian].
5. Ahmad W. et al. (2024) Comparative Analysis of Architectural Differences: Snort vs. Suricata. *Iraqi Journal for Computer Science and Mathematics*. Vol. 7, Issue 2. URL: <https://www.ijict.edu.iq/index.php/ijict/article/download/290/122>
6. Khan Z. et al. (2025) Improving Intrusion Detection with Hybrid Deep Learning Models: A Study on CIC-IDS2017, UNSW-NB15, and KDD CUP 99. *Journal of Information Systems Engineering and Management*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/389144460>
7. Reducing False Positives in Intrusion Detection Systems with Adaptive Machine Learning Algorithms. ResearchGate. 2025. URL: <https://www.researchgate.net/publication/390747122>
8. Gupta N., Jain A. (2016) Reducing False Positive in Intrusion Detection System: A Survey. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*. Vol. 7, No. 3. P. 1600–1603.
9. Yakub Reddy K., ShankarLingam G. (2024) Artificial Intelligence in Intrusion Detection Systems: Trends, Frameworks, and Future Directions for Cybersecurity. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. Vol. 12, No. 21. URL: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/7689>
10. Almiani M. et al. (2024) Comparative Performance Evaluation of Machine Learning Algorithms for Cyber Intrusion Detection. *Preprints*. <https://doi.org/10.20944/preprints202412.0497.v1>
11. Canadian Institute for Cybersecurity. Intrusion Detection Evaluation Dataset (CIC-IDS2017). University of New Brunswick. 2017. URL: <https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2017.html>
12. Khan Z. I. et al. (2024) A Comprehensive Study on CIC-IDS2017 Dataset for Intrusion Detection Systems. ResearchGate. URL: <https://www.researchgate.net/publication/378709289>
13. Maseer Z. K. et al. (2021) Benchmarking of Machine Learning for Anomaly Based Intrusion Detection Systems in the CICIDS2017 Dataset. *IEEE Access*. Vol. 9. P. 22351–22370. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3056614

Дата першого надходження статті до видання: 18.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

С. М. ШЕВЧЕНКО

кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки
імені професора Володимира Бурячка
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка
ORCID: 0000-0002-9736-8623

Ю. Д. ЖДАНОВА

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки
імені професора Володимира Бурячка
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка
ORCID: 0000-0002-9277-4972

С. Д. МЕЛЬНИЧУК

студентка факультету інформаційних технологій та математики
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка
ORCID: 0009-0006-7254-3305

АВТОМАТИЗАЦІЯ КОГНІТИВНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РИЗИКІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ: ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ MENTAL MODELER ТА FCM EXPERT

Фундаментальним елементом будь-якої архітектури безпеки є оцінка ризиків. Вона дозволяє систематизувати потенційні загрози та уразливості, а також спрогнозувати деструктивний вплив на конфіденційність, цілісність і доступність інформації, що є критичним для розробки дієвих заходів захисту. У цій роботі приділено особливу увагу питанню когнітивного моделювання ризиків із застосуванням спеціалізованого програмного інструментарію, зокрема рішень *Mental Modeler* та *FCM Expert*, що дозволяють візуалізувати та математично обґрунтувати складні взаємозв'язки в системах захисту.

Проведений у роботі аналіз наукових джерел дозволив систематизувати теоретичні засади та існуючі практичні рішення для оцінки ризиків, зокрема використання *SWOT*-аналізу, методик експертного оцінювання, апарату теорії ігор, нечіткої логіки, а також сучасних методів машинного навчання та алгоритмів кластеризації. Встановлено, що в умовах високої невизначеності та динамічності кіберпростору нечіткі когнітивні карти (*Fuzzy Cognitive Maps – FCM*) є одним із найбільш перспективних підходів. Вони надають унікальну можливість поєднувати якісну експертну оцінку з кількісними методами аналізу, дозволяючи моделювати різноманітні сценарії розвитку подій для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Практична значущість дослідження полягає у демонстрації можливостей автоматизації процесів моделювання за допомогою *Mental Modeler* та *FCM Expert*. У роботі детально описано розроблену архітектуру когнітивної моделі умовної організації, яка охоплює ключові вектори загроз, технічні та організаційні уразливості, а також наявні контрзаходи. На базі цієї моделі було реалізовано симуляцію сценарію фішингової атаки. Порівняльний аналіз результатів, отриманих у двох програмних середовищах, дозволив чітко розмежувати їхні функціональні ролі. Встановлено, що *Mental Modeler* був ефективним для початкового структурування експертних знань та швидкої візуалізації якісних тенденцій та є оптимальним для етапу мозкового штурму. В той самий час *FCM Expert* досяг глибиної математичної перевірки сценарію шляхом обчислення абсолютних значень стабілізації системи, зменшуючи суб'єктивність експертної оцінки.

Результати проведеного дослідження мають не лише теоретичне, а й освітнє значення. Матеріали та розроблені моделі були успішно апробовані у навчальному процесі під час викладання дисципліни «Теорія ризиків» для здобувачів спеціальності *F5 «Кібербезпека та захист інформації»*. Це підтверджує адаптивність запропонованих методів для підготовки фахівців, здатних оперувати складними аналітичними інструментами в умовах реальних викликів цифровій безпеці.

Ключові слова: ризики інформаційної безпеки, кіберризики, когнітивне моделювання, нечіткі когнітивні карти (*FCM*), *MENTAL MODELER*, *FCM EXPERT*.



S. M. SHEVCHENKO

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Information and Cyber Security
named after Professor Volodymyr Buriachok
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University
ORCID: 0000-0002-9736-8623

YU. D. ZHDANOVA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Information and Cyber Security
named after Professor Volodymyr Buriachok
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University
ORCID: 0000-0002-9277-4972

S. D. MELNYCHUK

Student at the Faculty of Information Technologies and Mathematics
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine
ORCID: 0009-0006-7254-3305

AUTOMATION OF COGNITIVE MODELING OF INFORMATION SECURITY RISKS: EXPERIENCE OF USING MENTAL MODELER AND FCM EXPERT

A fundamental element of any security architecture is risk assessment. It allows you to systematize potential threats and vulnerabilities, as well as predict the destructive impact on the confidentiality, integrity and availability of information assets, which is critical for the development of effective protection measures. This work pays special attention to the issue of cognitive risk modeling using specialized software tools, in particular, Mental Modeler and FCM Expert solutions, which allow you to visualize and mathematically substantiate complex relationships in protection systems.

The analysis of scientific sources conducted in the work allowed to systematize theoretical foundations and existing practical solutions for risk assessment, in particular the use of SWOT analysis, expert assessment methods, game theory apparatus, fuzzy logic, as well as modern machine learning methods and clustering algorithms. It was established that in conditions of high uncertainty and dynamism of cyberspace, fuzzy cognitive maps (Fuzzy Cognitive Maps – FCM) are one of the most promising approaches. They provide a unique opportunity to combine qualitative expert assessment with quantitative analysis methods, allowing to model various scenarios of events for making informed management decisions.

The practical significance of the study lies in demonstrating the possibilities of automating modeling processes using Mental Modeler and FCM Expert. The paper describes in detail the developed architecture of the cognitive model of a conditional organization, which covers key threat vectors, technical and organizational vulnerabilities, as well as existing countermeasures. Based on this model, a simulation of a phishing attack scenario was implemented. A comparative analysis of the results obtained in the two software environments allowed us to clearly distinguish their functional roles. It was found that Mental Modeler was effective for the initial structuring of expert knowledge and rapid visualization of qualitative trends and is optimal for the brainstorming stage. At the same time, FCM Expert achieved a deeper mathematical verification of the scenario by calculating the absolute values of system stabilization, reducing the subjectivity of expert assessment.

The results of the study are not only theoretical, but also educational. The materials and developed models were successfully tested in the educational process during the teaching of the discipline “Risk Theory” for applicants for the specialty F5 “Cybersecurity and Information Protection”. This confirms the adaptability of the proposed methods for training specialists capable of operating complex analytical tools in conditions of real challenges to digital security.

Key words: information security risks, cyber risks, cognitive modeling, fuzzy cognitive maps (FCM), MENTAL MODELER, FCM EXPERT.

Постановка проблеми

У сучасному суспільстві через стрімке зростання використання мережі Інтернет та активне поширення особистої інформації та інших конфіденційних даних у онлайн-середовищі, інформаційні активи та фінансові транзакції стають дедалі уразливішими для кіберзлочинців. Згідно звіту «Глобальний огляд кібербезпеки 2026» [1] респонденти вважають, що найпоширенішими атаками були: фішинг (включаючи вішинг та смішинг) – 62 %, шахрайство з розрахунками – 37 %, крадіжка особистих даних – 32 %. Занепокоєння викликає вплив штучного інтелекту на кібербезпеку: з одного боку, – це потужний підсилювач спроможностей, з іншого – технологічний допінг для зловмисників. Переважна більшість опитаних (87 %) констатують наявність системних уразливостей у своїх організаціях, зумовлених впровадженням технологій штучного інтелекту [1].

Оцінка ризиків інформаційної безпеки (ІБ) швидко стає необхідністю для забезпечення стійкості та цілісності системи. Попри декларативну важливість кіберзахисту, реальна кіберстійкість впроваджена лише у 2 %

організацій. Крім того, бізнес стикається з труднощами при вимірюванні ризиків: 47 % опитаних сумніваються в достовірності наявних методів оцінки кіберризиків, а ще 39 % стурбовані високим рівнем невизначеності результатів [2]. Саме тому прийняття управлінських рішень у цій сфері суттєво ускладнюється, особливо через динамічний характер загроз, високий рівень невизначеності та складність прогнозувати наслідки експлуатації уразливостей [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Оцінка ризиків інформаційної безпеки є вимогою будь-якої системи, оскільки вона закладає основу для побудови ефективної системи захисту, допомагаючи виявити потенційні загрози, уразливості та відповідні наслідки, спричинені порушенням конфіденційності, цілісності та доступності даних. У сучасній практиці зазвичай існує три типи традиційних методологій оцінки ризиків, які мають свої застосування та обмеження. Якісні методи залежать від експертної оцінки та лінгвістичних шкал для встановлення рівнів ризику, і їх зручно застосовувати, але вони є суб'єктивними. Кількісні підходи намагаються зібрати надійні числові результати, наприклад очікувані річні втрати (ALE) або середня частота виникнення інцидентів (ARO), але вони потребують великої кількості даних, які часто не є доступними через конфіденційність інформації про атаки. Гібридні методи беруть найкраще з кожної групи, дозволяючи експертам сформулювати свій досвід за допомогою математичних методів в умовах невизначеності та неповних вхідних даних [4].

У дослідженні [5] автори рекомендують технологію для оцінки ризиків ІБ на поєднанні теорії графів та експертного оцінювання.

Роботи [6–8] спрямовують відповідальних за кібербезпеку в організаціях застосовувати SWOT-аналіз та експертне оцінювання для початкового аналізу ризиків інформаційних активів.

Для малого та середнього бізнесу заслуговують на увагу дослідження [9, 10]. Ці організації потребують рішень, які є економічно ефективними, простими в управлінні та відповідають їхнім обмеженим фінансовим та людським ресурсам.

Запропоновано ґрунтовний підхід науковцями [11] до кількісного оцінювання кіберризиків, що базується на використанні нейронних мереж для моніторингу стану системи та автоматизації перевірки на відповідність міжнародним стандартам ІБ.

У наступній статті [12] ініційовано комплексну методологію оцінки ризиків інформаційної безпеки на основі галузевих стандартів, експертного досвіду та інтелектуального аналізу даних. Застосування алгоритмів машинного навчання та методу кластерного аналізу к-середніх дозволило виявити приховані загрози, а розробка тезауруса та теплових карт для візуалізації виводить оцінку ризику на новий рівень точності.

У межах дослідження [13] було синтезовано комбінований метод, що дає змогу оцінювати ризики та прогнозувати динаміку цифрових валют, застосовуючи теорію ігор, апарат нечіткої логіки та обчислювальну потужність нейромережевих моделей.

Оскільки близько 95 % усіх успішних атак виникають через людську помилку, звичайні технічні заходи захисту часто виявляються недостатніми, що вимагає використання формалізованих методів моделювання сценаріїв для дослідження складних взаємозв'язків між заходами безпеки та поведінкою зломисників [14].

Для аналізу таких систем нечіткі когнітивні карти (FCM) є одним з найперспективніших підходів, які надають спосіб моделювання з набором концепцій (вузлів) та причинно-наслідкових зв'язків між ними (зв'язані ребра), а також можливість аналізувати сценарії на основі принципу «що, якщо» (What-if) [4]. Саме когнітивне моделювання полягає в організації експертних знань та розумінні впливу факторів на загальний рівень безпеки організації [15–19], використання когнітивної моделі допомагає структурувати знання про систему безпеки та проводити як якісну, так і кількісну оцінку впливу різних факторів на загальну стійкість компанії [20], а метод оцінки інформаційних ризиків на підприємстві за допомогою нечітких когнітивних карт дозволяє скоротити час, необхідний для прийняття рішень щодо вибору необхідних контрзаходів у 1,5–2 рази [21].

Нині існують різні програмні інструменти для реалізації нечіткого когнітивного моделювання включаючи ті, що відрізняються аналітичними можливостями та зручністю інтерфейсу. У цій роботі будуть розглядатись два програмні інструменти: Mental Modeler – розроблений для підтримки групового прийняття рішень та спільної побудови моделей експертами, та FCM Expert – спеціалізована платформа, що використовує алгоритми машинного навчання для оптимізації топології мережі та аналізу сценаріїв. Кожен із цих інструментів має логіку обробки параметрів, що робить актуальним їхнє порівняння в умовах ідентичного сценарію кіберзагрози [22].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є проведення порівняльного аналізу результатів моделювання ризиків інформаційної безпеки за допомогою програмних засобів Mental Modeler та FCM Expert на прикладі сценарію фішингової атаки на віртуальну компанію «CloudGuard Systems».

Для досягнення поставленої мети передбачається розв'язання таких завдань:

1. Розглянути теоретичні засади функціонування нечітких когнітивних карт як інструменту управління ризиками.

2. Описати архітектуру когнітивної моделі уявної компанії «CloudGuard Systems», включаючи засоби захисту (РАМ, навчання персоналу), уразливості та загрози.

3. Виконати моделювання сценарію фішингової атаки в програмному середовищі Mental Modeler для оцінювання ризику витоку даних.

4. Провести аналогічну симуляцію в середовищі FCM Expert із використанням його засобів сценарного аналізу.

5. Здійснити порівняльний аналіз отриманих результатів та оцінити зручність і ефективність досліджуваних інструментів для прийняття рішень у сфері кібербезпеки.

Викладення основного матеріалу дослідження

1. Методологія нечіткого когнітивного моделювання ризиків.

У сучасному середовищі кібербезпеки існує потреба в інструментах, які ефективно працюють в умовах високої невизначеності та відсутності статистичних даних. Оскільки багато компаній приховують деталі успішних атак для захисту своєї репутації, аналітики змушені базувати свої аналізи на експертних оцінках та сценаріях випадків. Для цього типу аналізу нечіткі когнітивні карти (FCM), розроблені Бартом Коско як гібрид теорії нечітких множин, нейронних мереж та когнітивного картування, виявилися найпотужнішими інструментами [23]. FCM є представленням системи у вигляді орієнтованого графа, де вузли (концепти) є факторами ризику, а зважені ребра – асоціаціями причинності.

Модель FCM дозволяє перетворювати лінгвістичні оцінки експертів (такі як «сильний вплив», «слабкий вплив») у числові ваги в діапазоні $[-1,1]$, що дає можливість проведення обчислювальних експериментів [20]. Когнітивне моделювання корисне для демонстрації того, як формується структура загроз та для моніторингу швидкості змін з часом: як зміна одного вхідного параметра (наприклад, зрив у навчанні персоналу) вплине на інші в системі та призведе зростання ризику витоку даних. Це робить FCM потужним інструментом для проактивного захисту, де прогнозування наслідків замінює просте реагування на інциденти [15].

Аналіз системи за допомогою когнітивних карт традиційно поділяється на два взаємодоповнюючі напрями, які представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Напрями аналізу систем на основі нечітких когнітивних карт

Тип аналізу	Зміст дослідження	Практична цінність для кібербезпеки
Статичний	Оцінювання топології графа, розрахунок центральності концептів та щільності зв'язків мережі $\left(d = \frac{n}{N^2}\right)$	Виявлення критичних уразливостей (найбільш уразливих вузлів) та аналіз загальної архітектурної стійкості системи захисту
Динамічний	Ітераційне моделювання зміни станів концептів у часі до досягнення системою точки стабілізації	Проведення «What-if» симуляцій для прогнозування розвитку атак (наприклад фішингу) та оцінки ефективності впровадження РАМ або сегментації

2. Характеристика програмного забезпечення Mental Modeler

Інструмент Mental Modeler базується на хмарних технологіях і орієнтований на підтримку прийняття рішень через залучення експертів до спільної побудови моделей [24]. Програма дозволяє швидко створювати графічні представлення складних систем та аналізувати їх за допомогою спрощеного інтерфейсу, що не потребує глибоких знань. Однак, Mental Modeler має обмеження щодо автоматизації розрахунків та відсутності вбудованих алгоритмів машинного навчання для корекції ваг зв'язків. Ключові характеристики програмного засобу Mental Modeler подані у таблиці 2.

Таблиця 2

Ключові характеристики програмного засобу Mental Modeler

Критерій	Опис можливостей
Тип інтерфейсу	Веб-орієнтована платформа (Web-based), доступна через браузер, що забезпечує швидкий доступ
Призначення	Структурування експертних знань, підтримка групового прийняття рішень та візуалізація FCM
Сценарний аналіз	Можливість запуску базових симуляцій шляхом ручної зміни початкових станів концептів
Аналітичні функції	Автоматична класифікація компонентів на Driver (засоби захисту), Ordinary (загрози та уразливості) та Receiver (результати)
Обмеження	Відсутність алгоритмів навчання ваг на основі даних; обмежені параметри налаштування функцій активації

3. Характеристика програмного комплексу FCM Expert

На відміну від інструментів, які охоплюють більш спрощені завдання, FCM Expert є просунутою платформою на базі Java, призначеною для глибокого аналізу сценаріїв та класифікації патернів. Основною перевагою цього інструменту є інтеграція алгоритмів машинного навчання (Supervised та Unsupervised Learning), які можуть бути

використані для отримання оптимізації параметрів моделі та збіжності системи. FCM Expert використовується для великих наборів даних у форматі ARFF і застосовується для складних задач прогнозування в межах великих корпоративних організацій, які можуть обробляти великі системні середовища [22]. Ключові характеристики програмного засобу Mental Modeler подані у таблиці 3.

Таблиця 3

Ключові характеристики програмного комплексу FCM Expert

Критерій	Опис можливостей
Архітектура	Об'єктно-орієнтоване десктопне ПЗ на базі Java, що забезпечує кросплатформеність та стабільність обчислень
Машинне навчання	Підтримка еволюційних алгоритмів (PSO, GA, DE) для автоматичного обчислення ваг на основі даних та оптимізації структури мережі
Гнучкість симуляції	Можливість вибору функцій активації (<i>Sigmoid</i> , <i>Hyperbolic Tangent</i> , <i>Saturation</i>) та точне налаштування параметрів збіжності
Візуалізація динаміки	Генерація ітераційних графіків (Convergence Plotter) та аналіз стабільних станів системи (атракторів)
Робота з даними	Повна підтримка форматів CSV та ARFF, що дозволяє інтегрувати реальну статистику інцидентів у когнітивну модель

Отже, використання обраних інструментів дозволяє виконати повний цикл аналізу ризиків: від концептуального проектування системи безпеки в Mental Modeler до математично точного моделювання сценаріїв атак у FCM Expert.

4. Результати дослідження

1. Опис об'єкта дослідження. У межах проведення порівняльного експериментального дослідження об'єктом аналізу обрано інформаційну систему віртуальної компанії «CloudGuard Systems», яка спеціалізується на наданні хмарних послуг та розробляє інфраструктуру безпеки для корпоративних клієнтів. Така організація обрана через високу цінність їхніх інформаційних активів, включаючи персональні дані користувачів, вихідний код платформи та ключові бази даних. Оскільки інформація є одним з найцінніших активів сучасного підприємства, витік інформації через кібератаки може призвести до незворотних фінансових та репутаційних втрат.

У компанії налічується близько 250 співробітників в організаційній структурі, велика частина з яких має технічні спеціалізації. Однак попередній аналіз виявив ряд системних проблем. Багато співробітників можуть мати надмірний доступ (C4) через відсутність чітких регламентів, що призводить до значного розширення поверхні атаки. Наразі система захисту має мінімальні практики безпеки, а високопріоритетні технології, включаючи систему управління привілейованим доступом (PAM, C1) та глибоку сегментацію мережі (C2), ще не були належним чином впроваджені. Найслабшою ланкою залишається людський фактор. За статистикою, помилки персоналу є причиною до 95 % успішних кібератак, що робить навчання співробітників (C3) критично важливим компонентом безпеки. Для CloudGuard Systems було обрано сценарій агресивної фішингової кампанії (C6) – найбільш розповсюдженого типу загрози, що базується на методах соціальної інженерії для викрадення конфіденційних даних.

Для групування знань про систему та проведення подальшого моделювання було виділено 10 ключових концептів, які на основі методології когнітивного картування розподілені на три функціональні групи: Driver (засоби захисту), Ordinary (уразливості та загрози) та Receiver (результуючі показники). Перелік концептів та їхня характеристика наведені у Таблиці 4.

Обраний сценарій передбачає розвиток подій за принципом «найгіршого випадку»: відсутність навчання (C3 = -1) та недостатнє впровадження PAM (C1 = 0.2) створюють ідеальні умови для успішного фішингу, попри гарно розроблену сегментацію (C2 = 0.7). У поєднанні з надмірними правами доступу (C4 = 0.8), така система дозволяє зловмисникам реалізувати горизонтальне переміщення мережею, що безпосередньо впливає на цільові показники (C8, C9, C10). Таким чином, побудована модель дозволяє аналізувати не лише прямий вплив загроз, а й відсутність засобів захисту.

2. Побудова моделі та моделювання сценарію в Mental Modeler. Наступний етап дослідження передбачав побудову нечіткої когнітивної карти (FCM) для компанії CloudGuard Systems за допомогою середовища Mental Modeler. Цей інструмент є веб-орієнтованою платформою для моделювання, яка дозволяє згрупувати експертні знання у вигляді стандартизованих сценаріїв. Процес моделювання починається з перенесення визначених концептів (C1–C10) у графічне середовище та встановлення причинно-наслідкових зв'язків між ними. Згідно з методологією FCM, кожному зв'язку було присвоєно вагу в діапазоні від -1 до 1, що відображає інтенсивність та характер впливу одного фактора на інший.

Для систематизації взаємозв'язків була сформована когнітивна матриця, де були записані числові значення впливів (рис. 1).

На основі цієї матриці Mental Modeler автоматично створив орієнтований зважений граф, який візуалізує архітектуру ризиків компанії (рис. 2). Вузли представляють концепти, а ребра представляють динамічні зв'язки.

Таблиця 4

Концептуальна структура когнітивної моделі CloudGuard Systems

Тип концепту	ID	Назва концепту	Характеристика впливу в моделі
Driver	C1	PAM (Privileged Access Management)	Засіб захисту, що мінімізує можливість зловживання привілейованими правами
	C2	Сегментація мережі	Засіб захисту, спрямований на логічне обмеження поширення атаки
	C3	Навчання персоналу (Security Awareness)	Засіб захисту, що знижує ймовірність успіху соціальної інженерії
Ordinary	C4	Надмірні права доступу	Уразливість, що критично полегшує дії зловмисника після проникнення
	C5	Відсутність сегментації	Технічна уразливість, що дозволяє безперешкодно переміщатися всередині периметра
	C6	Фішинг	Активна загроза, яка є початковим вектором більшості кібератак
	C7	Lateral Movement	Загроза, що полягає у поширенні контролю зловмисника всередині мережі компанії
Receiver	C8	Ризик витоку даних	Кінцевий негативний результат реалізації ланцюжка загроз
	C9	Рівень кібербезпеки	Інтегральний показник, що відображає ефективність вжитих заходів захисту
	C10	Операційна стабільність	Показник здатності бізнес-процесів компанії функціонувати в умовах інциденту

	C1 (PAM)	C2 (Сегментація)	C3 (Навчання)	C4 (Надмірні права)	C5 (Відсутність сегментації)	C6 (Фішинг)	C7 (Lateral Movement)	C8 (Ризик витоку)	C9 (Рівень безпеки)	C10 (Стабільність)
C1 (PAM)		▼	▼	-0.4 ▼	▼	▼	-0.1 ▼	▼	0.4 ▼	0.1 ▼
C2 (Сегментація)	▼		▼	▼	-0.5 ▼	▼	-0.2 ▼	▼	▼	0.3 ▼
C3 (Навчання)	▼	▼		-0.1 ▼	▼	-0.3 ▼	▼	▼	0.6 ▼	▼
C4 (Надмірні права)	▼	-0.3 ▼	▼		▼	▼	0.4 ▼	0.3 ▼	▼	▼
C5 (Відсутність сегментації)	-0.1 ▼	-0.2 ▼	▼	▼		▼	0.4 ▼	0.4 ▼	▼	▼
C6 (Фішинг)	▼	▼	▼	0.5 ▼	▼		0.4 ▼	0.1 ▼	▼	▼
C7 (Lateral Movement)	▼	-0.3 ▼	▼	▼	0.4 ▼	▼		0.3 ▼	▼	▼
C8 (Ризик витоку)	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼		-0.5 ▼	-0.5 ▼
C9 (Рівень безпеки)	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	-0.5 ▼		0.5 ▼
C10 (Стабільність)	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	

Рис. 1. Когнітивна матриця взаємовпливів факторів для CloudGuard Systems у середовищі Mental Modeler

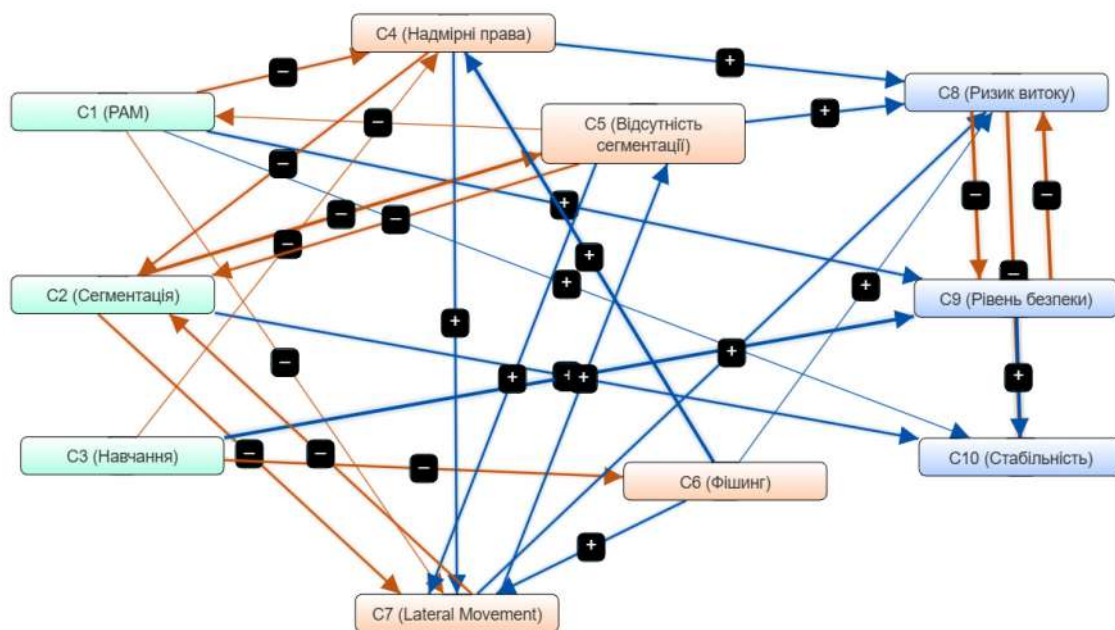


Рис. 2. Графічна візуалізація нечіткої когнітивної карти у Mental Modeler

Вихід цього графа, таким чином, може бути використаний для відображення критичних шляхів поширення атак, зокрема ланцюжок від фішингу через горизонтальне переміщення до кінцевого витoku даних.

Для оцінювання структурної складності побудованої системи було розраховано щільність зв'язків (d) за формулою $d = \frac{n}{N^2}$ (або $d = \frac{n}{N(N-1)}$), де n – кількість зв'язків, а N – кількість концептів. Для нашої моделі з 10 концептами та 27 визначеними зв'язками показник щільності 0.3 свідчить про помірний рівень зв'язності, що вказує на наявність достатніх можливостей для проведення сценарного аналізу.

Після побудови статичної моделі було проведено динамічне моделювання зі сценарієм фішингової атаки. Початкові припущення сценарію були наступним: повна відсутність навчання персоналу ($C3 = -1$), надмірні права доступу ($C4 = 0.8$) і часткова реалізація РАМ та сегментації для перевірки їх ефективності. Результати моделювання, що на рис. 3, показують, що успіх фішингу ($C6$) і горизонтального переміщення ($C7$) значно збільшився, що призвело до критичного зниження на -0.25 інтегрального рівня кібербезпеки ($C9$) і збільшення ризику витoku даних ($C8$).

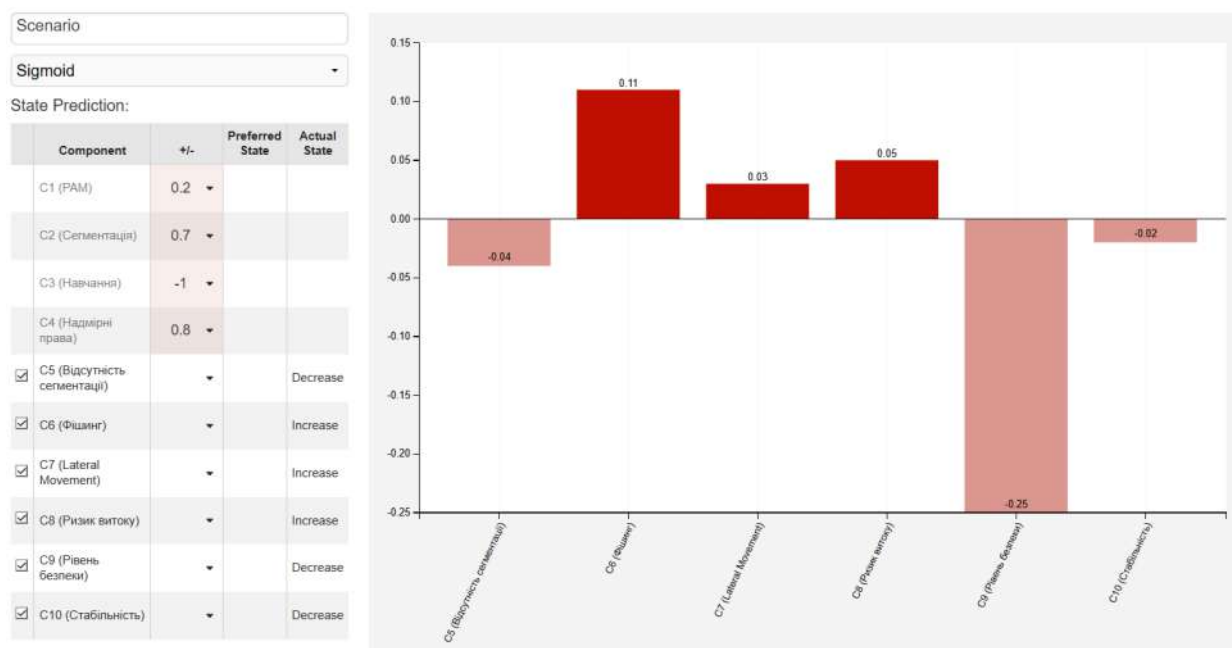


Рис. 3. Результати симуляції сценарію фішингової атаки на CloudGuard Systems у середовищі Mental Modeler

Отримані дані підтверджують, що навіть при мінімальних заходах безпеки, нехтування людським фактором (у нашому випадку навчанням) та привілейованим доступом створює передумови для реалізації критичного ризику. Результати цієї симуляції у Mental Modeler стануть основою для подальшого порівняння з обчисленнями у середовищі FCM Expert.

3. Моделювання сценарію в програмному комплексі FCM Expert. Математична логіка цього інструменту базується на розрахунку абсолютного кінцевого стану системи, що дозволяє виявити стабільні аттрактори та приховані патерни в архітектурі безпеки CloudGuard Systems. У FCM Expert повинні порівнювати дельту (зміну) з рівновагою проти базової рівноваги системи під впливом зовнішніх стимулів [22].

Методологія дослідження передбачає три етапи: фіксацію базового стану, налаштування вхідних параметрів сценарію та аналіз фінальних результатів.

Першим кроком було визначено «базовий результат» – стан системи без втручання злоумисників. За умови нейтральної активації всіх концептів (0.5), система автоматично прямує до стабілізації за допомогою обраної сигмоїдної функції активації. Це дає змогу побачити природну стійкість мережі (рис. 4).

Згідно з графіком на рис. 4, за нейтральних умов рівень безпеки та ризиків стабілізується на 6-й ітерації. Кількісні дані базового стану наведені на рис. 5.

З аналізу рис. 5 видно, що у стані спокою показник «Ризик витoku даних» ($C8$) становить 0.7624, а «Рівень кібербезпеки» ($C9$) – 0.7313. Ці цифри слугують точкою відліку для оцінювання масштабу руйнівного впливу фішингової атаки.

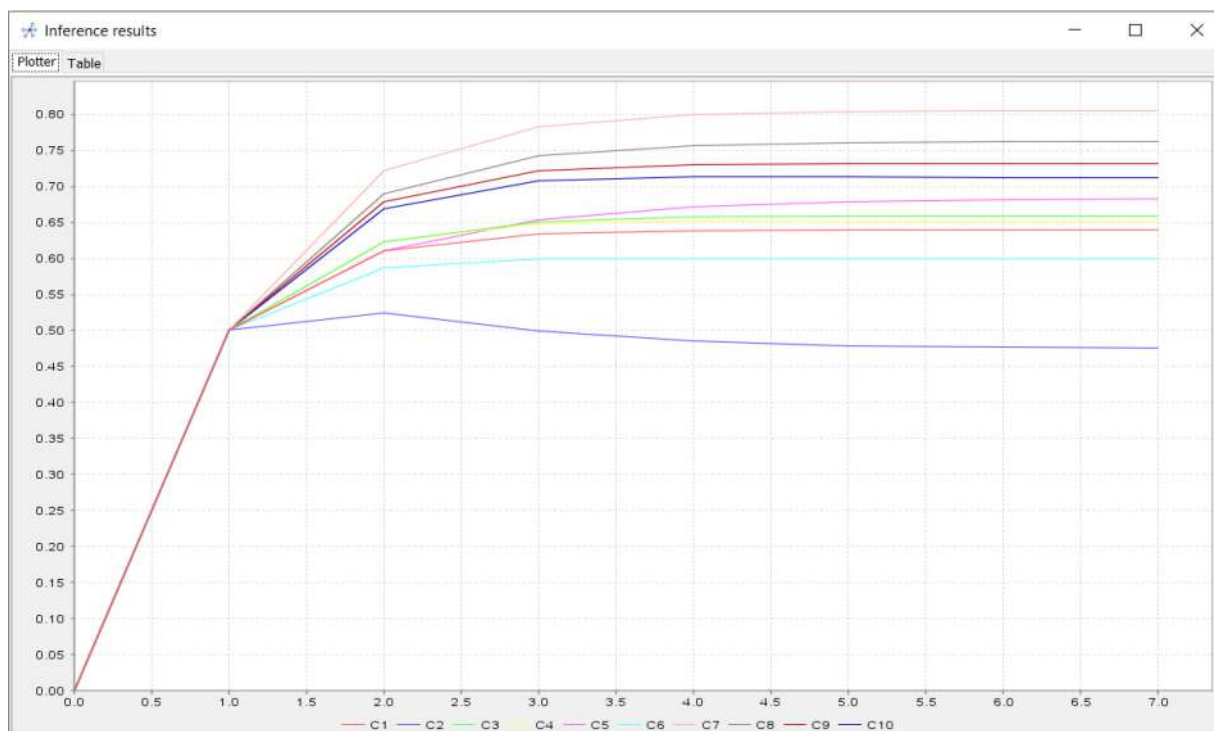


Рис. 4. Графік динаміки збіжності концептів до стабільного стану (Baseline Plotter)

Step	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2	0.6106	0.525	0.6225	0.6225	0.6106	0.5866	0.7211	0.69	0.6792	0.6682
3	0.634	0.4999	0.6508	0.6478	0.654	0.5987	0.783	0.742	0.7215	0.7071
4	0.6384	0.485	0.6572	0.6521	0.672	0.5995	0.7989	0.7562	0.73	0.713
5	0.6391	0.4788	0.6586	0.6527	0.679	0.5993	0.8034	0.7605	0.7314	0.7129
6	0.639	0.4766	0.659	0.6527	0.6816	0.5991	0.8047	0.7619	0.7314	0.7122
7	0.639	0.4758	0.659	0.6527	0.6825	0.599	0.8052	0.7624	0.7313	0.7117

Рис. 5. Таблиця значень базового стану концептів (Inference Table – Baseline)

На основі обраного сценарію (слабка реалізація РАМ, навчання та надмірні права) було виконано ініціалізацію вхідних значень для концептуальних драйверів та уразливостей (рис. 6). Значення 0.2 було присвоєно концепту С1 (РАМ), що імітувало існування критично слабкої реалізації системи контролю доступу. Щодо С2 (Сегментація), значення було присвоєно 0.7, що відповідає частковій ізоляції мережі.

Для моделювання активної загрози фішингу ключовими факторами виступили відсутність навчання (С3 = -1) та експлуатація надмірних прав (С4 = 0.8) (рис. 7).

Коли була запущена ітерація, система продемонструвала чітку зміну динаміки. Графік Plotter (рис. 8) чітко показує каскадний ефект: початкові уразливості активують фішингові загрози (С6) та горизонтальне переміщення (С7), що призводить до зниження лінії показників ефективності.

Кількісне підтвердження небезпеки сценарію відображено в фінальній таблиці (рис. 9).

Симуляція FCM Expert показує, що через відсутність навченого персоналу (С3 = -1.0) та обмежений контроль доступу (С1 = 0.2), система безпеки неминуче призводить до компрометації. На 7-й ітерації модель досягла стабільного стану, що вказує на постійний процес розвитку атаки. Таким чином, надмірні привілеї в С4 (які були визначені як 0.8) дозволять зловмисникам переміщатися мережею без перешкод (С7 = 0.8234). Це чітко пояснює, як людська вразливість може стати шлюзом для експлуатації дірок у системі безпеки інфраструктури.

У кількісному аналізі сценарію катастрофічне зниження інтегрального показника «Рівень кібербезпеки» (С9) з 0.7313 до 0.3634 вказує на процес втрати контролю над захистом цього критичного активу. Водночас ризик витоку даних (С8) зріс до критичного рівня – 0.8099, що ще більше підкреслює ризик негативних наслідків без негайної інтеграції систем РАМ та програм навчання. FCM Expert використовувався не лише для візуалізації напрямку змін, але й для обчислення математичної оцінки стану системи в «найгіршому сценарії», що буде слугувати основою для подальшого порівняння програмних інструментів.

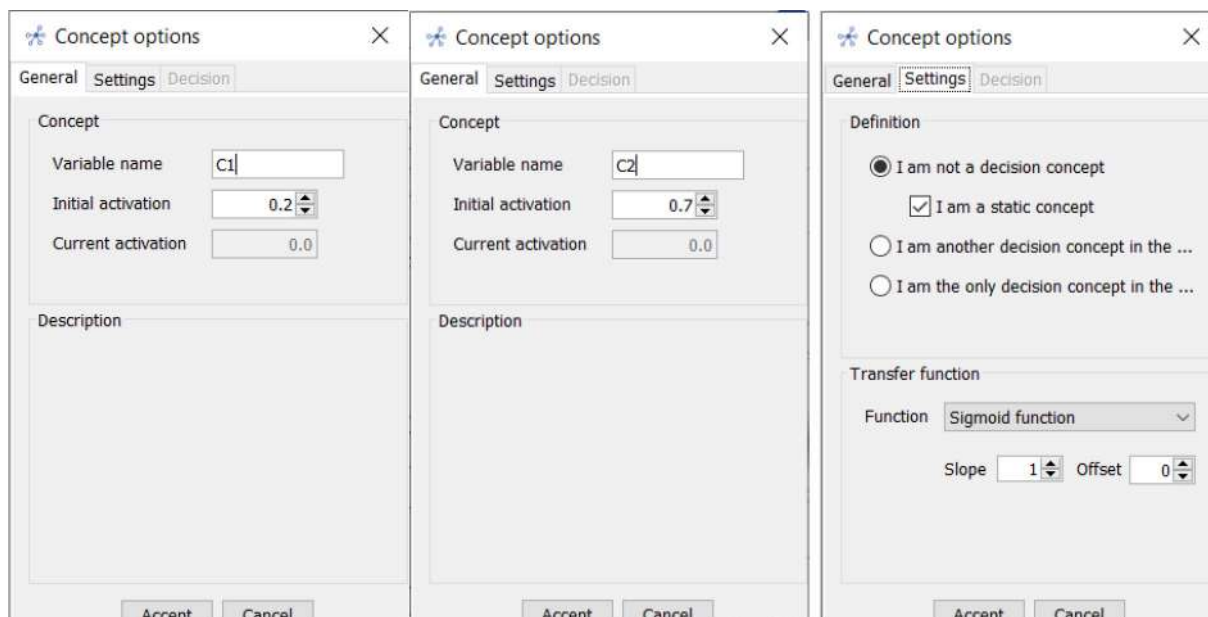


Рис. 6. Налаштування Initial activation для концептів C1 (РАМ) та C2 (Сегментація)

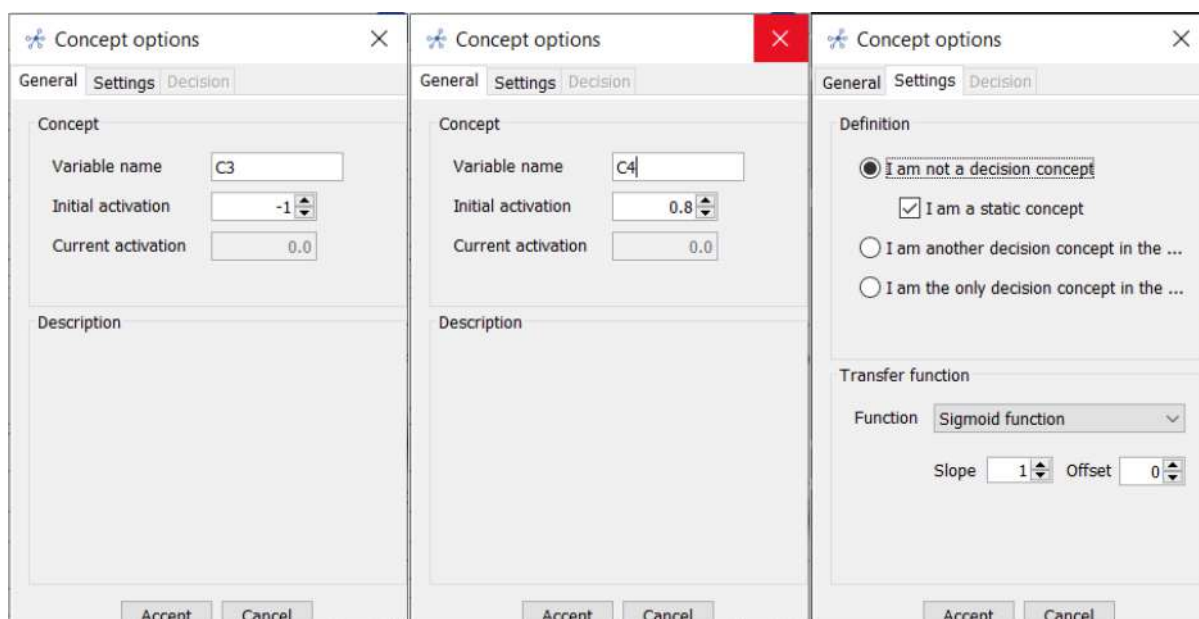


Рис. 7. Введення значень сценарію для чинників навчання (C3) та надмірних прав (C4)

4. Порівняльний аналіз результатів. Остаточний етап дослідження полягає в порівнянні результатів моделювання сценаріїв, отриманих за допомогою Mental Modeler та FCM Expert. Незважаючи на фундаментальні відмінності в алгоритмах (відносні зміни проти абсолютних значень), обидва програмні інструменти продемонстрували високий рівень кореляції в результатах, підкреслюючи критичну уразливість компанії «CloudGuard Systems» за обраним сценарієм.

Узагальнена порівняльна характеристика кількісних показників впливу атаки на цільові концепти наведена в Таблиці 5.

Аналіз даних показує, що обидва інструменти ідентифікували людський фактор ($C_3 = -1$) та відсутність РАМ (C_1) як ключові катализатори успішної атаки. У Mental Modeler ми спостерігаємо візуалізацію, де падіння рівня безпеки (-0.25) є найсильнішим сигналом. У свою чергу, FCM Expert математично обґрунтовує це зниження, показуючи, що система не лише «погіршується», але й стабілізується на критичній точці (атракторі) з рівнем безпеки лише 0.36, що є неприйнятним для ІТ-компанії.

Окрім кількісних даних, було проведено оцінювання функціональних можливостей програмних засобів, що важливо для вибору інструментарію залежно від завдань аналітика (таблиця 6).

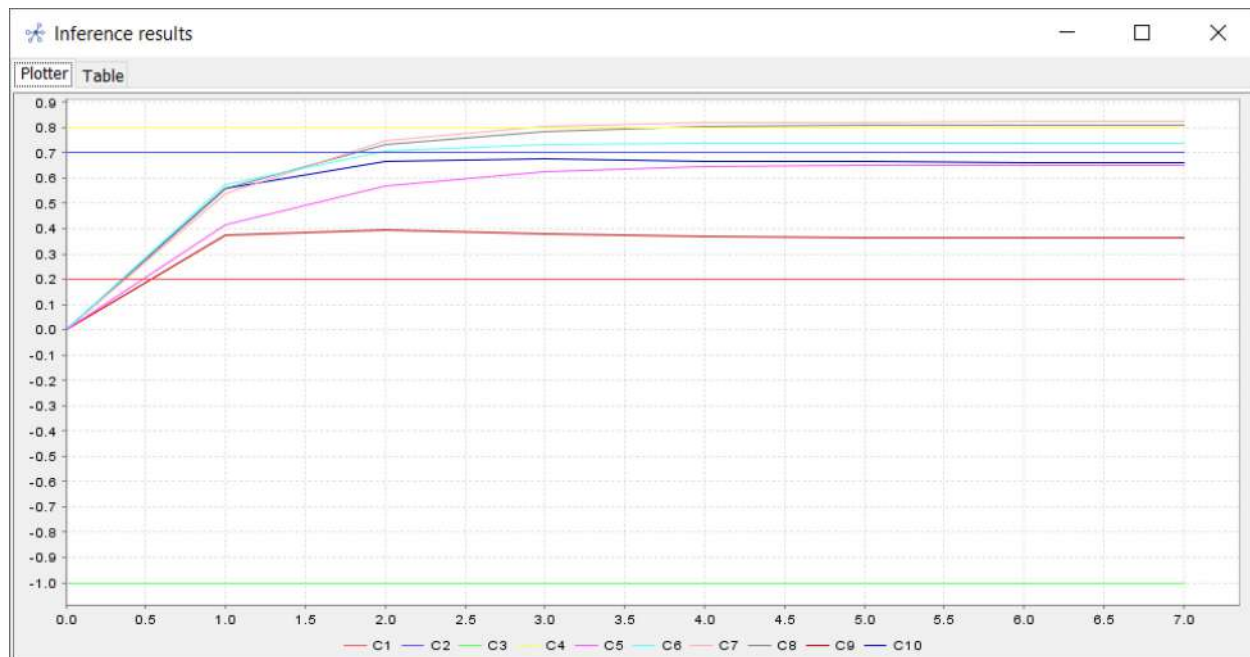


Рис. 8. Графік динаміки станів після симуляції сценарію (Scenario Plotter)

Inference results										
Plotter Table										
Step	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
0	0.2	0.7	-1.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.2	0.7	-1.0	0.8	0.4134	0.5744	0.5399	0.5597	0.3729	0.5572
2	0.2	0.7	-1.0	0.8	0.5694	0.7057	0.7493	0.7307	0.3948	0.6668
3	0.2	0.7	-1.0	0.8	0.6269	0.7322	0.8052	0.7852	0.3798	0.6746
4	0.2	0.7	-1.0	0.8	0.6454	0.7373	0.8189	0.8023	0.3699	0.6686
5	0.2	0.7	-1.0	0.8	0.6509	0.7383	0.8223	0.8077	0.3656	0.6643
6	0.2	0.7	-1.0	0.8	0.6524	0.7385	0.8232	0.8093	0.3639	0.6622
7	0.2	0.7	-1.0	0.8	0.6529	0.7386	0.8234	0.8099	0.3634	0.6614

Рис. 9. Фінальні значення моделювання сценарію для CloudGuard Systems

Таблиця 5

Порівняльний аналіз результатів моделювання в Mental Modeler та FCM

Цільовий концепт	Mental Modeler (Відносна зміна)	FCM Expert (Базовий стан → Сценарій)	FCM Expert (Розрахована дельта)
C8: Ризик витоку даних	+0.05 (Зростання)	0.7624 → 0.8099	+0.0475
C9: Рівень кібербезпеки	-0.25 (Падіння)	0.7313 → 0.3634	-0.3679
C10: Стабільність	-0.02 (Зниження)	0.7117 → 0.6614	-0.0503

Таблиця 6

Порівняння функціональних особливостей Mental Modeler та FCM

Критерій	Mental Modeler	FCM Expert
Математична логіка	Фокус на дельтах (відносних змінах від початкового стану)	Фокус на абсолютних станах активації та точках стабілізації (атракторах)
Зручність інтерфейсу	Веб-орієнтований (SaaS), інтуїтивно зрозумілий, не потребує встановлення	Десктопний (Java), потребує навичок аналізу даних та налаштування параметрів
Аналіз динаміки	Спрощена візуалізація змін («What-if») у вигляді гістограм впливу	Поглиблений аналіз ітераційних кроків із візуалізацією кривих збіжності
Навчання моделі	Відсутнє (модель базується виключно на суб'єктивних оцінках експерта)	Наявні алгоритми Machine Learning (PSO, GA, DE) для корекції ваг на основі даних
Цільова аудиторія	Стейкхолдери, менеджери, фахівці нетехнічного профілю	Дослідники, аналітики кіберризиків, інженери з математичного моделювання

Як показують результати, Mental Modeler доцільно використовувати на етапі мозкового штурму та початкового структурування загроз швидкої візуалізації наслідків рішень. Однак для прийняття фінансово відповідальних рішень, таких як розрахунок точного рівня ризику або оптимізація топології захисту, FCM Expert є значно

ефективнішим завдяки можливості використовувати алгоритми машинного навчання та оцінювати збіжність системи.

Таким чином, інструменти не замінюють, а доповнюють один одного: кількісний результат у FCM Expert математично підтверджує якісні тенденції, виявлені в Mental Modeler.

Висновки

У ході виконання роботи було проведено комплексне дослідження методів оцінки ризиків інформаційної безпеки за допомогою нечіткого когнітивного моделювання на прикладі умовної компанії «CloudGuard Systems». Використання сценарію фішингової атаки дозволило наочно продемонструвати можливості програмного забезпечення для прогнозування наслідків експлуатації уразливостей в умовах високої невизначеності.

Головним результатом дослідження стало підтвердження гіпотези про те, що поєднання людського фактора (такого як відсутність навчання персоналу, C3) та архітектурних недоліків (надмірні права доступу, C4) призводить до катастрофічного зростання ризику витоку даних (C8). Моделювання показало, що навіть за наявності базової сегментації мережі, ігнорування впровадження системи РАМ (C1) робить інфраструктуру прозорою для горизонтального переміщення зловмисників (C7), що підтверджується падінням інтегрального показника рівня кібербезпеки (C9) більш ніж удвічі.

Порівняння серед інструментів моделювання показало їх ключові особливості. Mental Modeler був ефективним для початкового структурування експертних знань та швидкої візуалізації якісних тенденцій та є оптимальним для етапу мозкового штурму. В той час як FCM Expert досяг глибшої математичної перевірки сценарію шляхом обчислення абсолютних значень стабілізації системи. Використовуючи певні алгоритми машинного навчання, цей інструмент зменшує суб'єктивність експертної оцінки та призводить до більш точних кількісних прогнозів, що є важливим для інвестиційних рішень, пов'язаних із захисними заходами.

Отримані дані свідчать, що інструменти не є взаємовиключними, а доповнюють один одного на різних стадіях управління ризиками.

Результати дослідження було апробовано у процесі навчання дисципліни Теорія ризиків студентів спеціальності F5 Кібербезпека та захист інформації Київського столичного університету імені Бориса Грінченка.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці гібридних методик, здатних інтегрувати нечіткі когнітивні карти з системами моніторингу подій безпеки (SIEM) у режимі реального часу, а також переходу від статичного аналізу сценаріїв до безперервного адаптивного управління ризиками, яке автоматично оновлює ваги зв'язків між загрозами та активами на основі реальних даних про інциденти. Також перспективним є дослідження впливу автоматизованого навчання топології мереж на точність прогнозування складних багатокрокових атак у хмарних середовищах.

Список використаної літератури

1. World Economic Forum. (2026). *Global cybersecurity outlook 2026: Insight report*. <https://www.weforum.org/publications/global-cybersecurity-outlook-2026/>
2. UK Government. (2025). *Cyber security breaches survey 2025*. <https://www.gov.uk/government/statistics/cyber-security-breaches-survey-2025/cyber-security-breaches-survey-20254>
3. Shevchenko, S., Zhdanova, Y., Shevchenko, H., Nehodenko, O., & Spasiteleva, S. (2023). Information security risk management using cognitive modeling. In *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems* (Vol. 3550, pp. 297–305). <https://ceur-ws.org/Vol-3550/short15.pdf>
4. Felix, G., Napoles Ruiz, G., Falcon, R., Froelich, W., Vanhoof, K., & Bello, R. (2017). A review on methods and software for fuzzy cognitive maps. *Artificial Intelligence Review*, 52(3), 1707–1737. <https://doi.org/10.1007/s10462-017-9575-1>
5. Карпович, І., Гладка, О., & Бухало, Ю. (2021). Технології моделювання і оцінки ризиків інформаційної безпеки. *Технічні науки та технології*, 1(23), 62–68. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-1\(23\)-62-68](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-1(23)-62-68)
6. Шевченко, С. М., Жданова, Ю. Д., Спасьїтелева, С. О., & Складаний, П. М. (2020). Проведення SWOT-аналізу оцінювання інформаційних ризиків як засіб формування практичних навичок студентів спеціальності 125 Кібербезпека. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, 2(10), 158–168. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2020.10.158168>
7. Shevchenko, H., Shevchenko, S., Zhdanova, Y., Spasiteleva, S., & Nehodenko, O. (2021). Information security risk analysis SWOT. In *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems* (Vol. 2923, pp. 309–317). <http://ceur-ws.org/Vol-2923/paper34.pdf>
8. Дзюба, Л., & Чмир, О. (2022). Оцінювання ризиків інформаційної безпеки з використанням методів математичної статистики. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*, 26, 47–54. <https://doi.org/10.32447/20784643.26.2022.06>
9. Шевченко, С. М., Жданова, Ю. Д., & Кравчук, К. В. (2021). Модель захисту інформації на основі оцінки ризиків інформаційної безпеки для малого та середнього бізнесу. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, 2(14), 158–175. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2021.14.158175>

10. Шевченко, С., Жданова, Ю., & Кія, О. (2025). Напівавтоматизований інструмент багатостандартної оцінки кіберзрілості організації на основі NIST CSF 2.0, ISO/IEC 27001:2022, COBIT 2019 та CIS Controls v8. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, 3(31), 43–60. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.31.1004>
11. Палко, Д., & Мирутенко, Л. (2024). Метод комплексної оцінки ризиків кібербезпеки в розподілених інформаційних системах. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, 2(26), 487–502. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.26.731>
12. Barlybayev, A., Sharipbay, A., Shakhmetova, G., & Zhumadillayeva, A. (2024). Development of a flexible information security risk model using machine learning methods and ontologies. *Applied Sciences*, 14(21), 9858. <https://doi.org/10.3390/app14219858>
13. Bebeshko, B., Malyukov, V., Lakhno, M., Skladannyi, P., Sokolov, V., Shevchenko, S., & Zhumadilova, M. (2022). Application of game theory, fuzzy logic and neural networks for assessing risks and forecasting rates of digital currency. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 100(24), 7390–7404.
14. Alkhalil, Z., Hewage, C., Nawaf, L., & Khan, I. (2021). Phishing attacks: A recent comprehensive study and a new anatomy. *Frontiers in Computer Science*, 3, 563060. <https://doi.org/10.3389/fcomp.2021.563060>
15. Stylios, C. D., & Groumpos, P. P. (2004). Modeling complex systems using fuzzy cognitive maps. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, 34(1), 155–162.
16. Shevchenko, S., Zhdanova, Y., Kryvytska, O., Shevchenko, H., & Spasiteleva, S. (2024). Fuzzy cognitive mapping as a scenario approach for information security risk analysis. In *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II* (Vol. 3826, pp. 356–362). <https://ceur-ws.org/Vol-3826/short28.pdf>
17. Шевченко, С., Жданова, Ю., Складанний, П., & Петренко, Т. (2024). Нечіткі когнітивні карти як інструмент візуалізації сценаріїв реагування на інциденти в системах безпеки. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, 26(2), 419–429. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.26.707>
18. Шевченко, С. М., Жданова, Ю. Д., & Гаркушенко, А. М. (2025). Когнітивне моделювання сценаріїв для прогнозування кіберризиків. In *Technical, agricultural and mathematical sciences: scientific trends, problems and ways of their development: collective monograph*. Boston: Primedia eLaunch. (Pp. 178–196) <https://isg-konf.com/uk/information-technologies-engineering-transport-and-construction-the-latest-technologies-in-the-development-of-sciences/>
19. Soner, O. (2025). Modeling and analyzing cybersecurity risk propagation in ports using fuzzy cognitive maps: System sensitivity to key threat factors. *Ocean & Coastal Management*, 270, 107857. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107857>
20. Papageorgiou, E. I., & Salmeron, J. L. (2012). A review of fuzzy cognitive maps research during the last decade. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 21(1), 66–79.
21. Kostiuk, Y., Skladannyi, P., Samoilenko, Y., Khorolska, K., Bebeshko, B., & Sokolov, V. (2025). A system for assessing the interdependencies of information system agents in information security risk management using cognitive maps. In *Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks 2024* (Vol. 3925, pp. 249–264).
22. Nápoles, G., et al. (2018). FCM expert: Software tool for scenario analysis and pattern classification based on fuzzy cognitive maps. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 27(7), 1860010.
23. Gray, S. A., et al. (2015). Using fuzzy cognitive mapping as a participatory approach to analyze Change, Preferred States, and Perceived Resilience of Social-Ecological Systems, *Ecology and Society*, 20(2).

References

1. World Economic Forum. (2026). *Global cybersecurity outlook 2026: Insight report*. <https://www.weforum.org/publications/global-cybersecurity-outlook-2026/>
2. UK Government. (2025). *Cyber security breaches survey 2025*. <https://www.gov.uk/government/statistics/cyber-security-breaches-survey-2025/cyber-security-breaches-survey-20254>
3. Shevchenko, S., Zhdanova, Y., Shevchenko, H., Nehodenko, O., & Spasiteleva, S. (2023). Information security risk management using cognitive modeling. In *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems* (Vol. 3550, pp. 297–305). <https://ceur-ws.org/Vol-3550/short15.pdf>
4. Felix, G., Napoles Ruiz, G., Falcon, R., Froelich, W., Vanhoof, K., & Bello, R. (2017). A review on methods and software for fuzzy cognitive maps. *Artificial Intelligence Review*, 52(3), 1707–1737. <https://doi.org/10.1007/s10462-017-9575-1>
5. Karpovych, I., Hladka, O., & Bukhala, Yu. (2021). Tekhnolohii modeliuvannia i otsinky ryzykiv informatsiinoi bezpeky [Technologies for modeling and assessing information security risks]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, 1(23), 62–68. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-1\(23\)-62-68](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-1(23)-62-68)
6. Shevchenko, S. M., Zhdanova, Yu. D., Spasiteliieva, S. O., & Skladannyi, P. M. (2020). Provedennia SWOT-analizu otsiniuvannia informatsiinykh ryzykiv yak zasib formuvannia praktychnykh navychok studentiv spetsialnosti 125 Kiberbezpeka [Conducting SWOT analysis of information risk assessment as a tool for forming practical skills of cybersecurity students]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, 2(10), 158–168. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2020.10.158168>

7. Shevchenko, H., Shevchenko, S., Zhdanova, Y., Spasiteleva, S., & Nehodenko, O. (2021). Information security risk analysis SWOT. In *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems* (Vol. 2923, pp. 309–317). <http://ceur-ws.org/Vol-2923/paper34.pdf>
8. Dziuba, L., & Chmyr, O. (2022). Otsiniuvannia ryzykiv informatsiinoi bezpeky z vykorystanniam metodiv matematychnoi statystyky [Assessment of information security risks using methods of mathematical statistics]. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiediialnosti*, 26, 47–54. <https://doi.org/10.32447/20784643.26.2022.06>
9. Shevchenko, S. M., Zhdanova, Yu. D., & Kravchuk, K. V. (2021). Model zakhystu informatsii na osnovi otsinky ryzykiv informatsiinoi bezpeky dlia maloho ta serednoho biznesu [Information protection model based on information security risk assessment for small and medium-sized business]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, 2(14), 158–175. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2021.14.158175>
10. Shevchenko, S., Zhdanova, Yu., & Kiia, O. (2025). Napiavtomatyzovanyi instrument bahatostandartnoi otsinky kiberzrilosti orhanizatsii na osnovi NIST CSF 2.0, ISO/IEC 27001:2022, COBIT 2019 ta CIS Controls v8 [Semi-automated multi-standard cyber maturity assessment tool based on NIST CSF 2.0, ISO/IEC 27001:2022, COBIT 2019 and CIS Controls v8]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, 3(31), 43–60. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.31.1004>
11. Palko, D., & Myrutenko, L. (2024). Metod kompleksnoi otsinky ryzykiv kiberbezpeky v rozpodilenykh informatsiinykh systemakh [Method of comprehensive assessment of cybersecurity risks in distributed information systems]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, 2(26), 487–502. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.26.731>
12. Barlybayev, A., Sharipbay, A., Shakhmetova, G., & Zhumadillayeva, A. (2024). Development of a flexible information security risk model using machine learning methods and ontologies. *Applied Sciences*, 14(21), 9858. <https://doi.org/10.3390/app14219858>
13. Bebashko, B., Malyukov, V., Lakhno, M., Skladannyi, P., Sokolov, V., Shevchenko, S., & Zhumadilova, M. (2022). Application of game theory, fuzzy logic and neural networks for assessing risks and forecasting rates of digital currency. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 100(24), 7390–7404.
14. Alkhalil, Z., Hewage, C., Nawaf, L., & Khan, I. (2021). Phishing attacks: A recent comprehensive study and a new anatomy. *Frontiers in Computer Science*, 3, 563060. <https://doi.org/10.3389/fcomp.2021.563060>
15. Stylios, C. D., & Groumpos, P. P. (2004). Modeling complex systems using fuzzy cognitive maps. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, 34(1), 155–162.
16. Shevchenko, S., Zhdanova, Y., Kryvytska, O., Shevchenko, H., & Spasiteleva, S. (2024). Fuzzy cognitive mapping as a scenario approach for information security risk analysis. In *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II* (Vol. 3826, pp. 356–362). <https://ceur-ws.org/Vol-3826/short28.pdf>
17. Shevchenko, S. M., Zhdanova, Yu. D., Skladannyi, P. M., & Petrenko, T. (2024). Nechitki kohnityvni karty yak instrument vizualizatsii stsenariiv reahuvannia na intsydenyty v systemakh bezpeky [Fuzzy cognitive maps as a tool for visualizing incident response scenarios in security systems]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, 26(2), 419–429. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.26.707>
18. Shevchenko, S. M., Zhdanova, Yu. D., & Harkushenko, A. M. (2025). Kohnityvne modeliuвання stsenariiv dlia prohnzuvannia kiberryzykiv [Cognitive modeling of scenarios for predicting cyber risks]. In *Technical, agricultural and mathematical sciences: scientific trends, problems and ways of their development: collective monograph*. Boston: Primedia eLaunch. (Pp. 178–196) <https://isg-konf.com/uk/information-technologies-engineering-transport-and-construction-the-latest-technologies-in-the-development-of-sciences/>
19. Soner, O. (2025). Modeling and analyzing cybersecurity risk propagation in ports using fuzzy cognitive maps: System sensitivity to key threat factors. *Ocean & Coastal Management*, 270, 107857. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107857>
20. Papageorgiou, E. I., & Salmeron, J. L. (2012). A review of fuzzy cognitive maps research during the last decade. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 21(1), 66–79.
21. Kostiuk, Y., Skladannyi, P., Samoilenko, Y., Khorolska, K., Bebashko, B., & Sokolov, V. (2025). A system for assessing the interdependencies of information system agents in information security risk management using cognitive maps. In *Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks 2024* (Vol. 3925, pp. 249–264).
22. Nápoles, G., et al. (2018). FCM expert: Software tool for scenario analysis and pattern classification based on fuzzy cognitive maps. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 27(7), 1860010.
23. Gray, S. A., et al. (2015). Using fuzzy cognitive mapping as a participatory approach to analyze Change, Preferred States, and Perceived Resilience of Social-Ecological Systems, *Ecology and Society*, 20(2).

Дата першого надходження статті до видання: 12.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

В. Г. ШЕРСТЮК

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри програмних засобів і технологій
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-9096-2582

С. А. ЩЕРБАНЮК

аспірант
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0001-5472-8019

ФОРМАЛЬНА МОДЕЛЬ СЦЕНАРНО-ПРЕЦЕДЕНТНОЇ КООРДИНАЦІЇ ГЕТЕРОГЕННИХ АНСАМБЛІВ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ ТА АЛГОРИТМ ЇЇ АДАПТАЦІЇ У ДИНАМІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

У статті розглянуто задачу координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів (БПА) у динамічних та невизначених умовах із застосуванням сценарно-прецедентного підходу. На відміну від попередніх досліджень, де основний акцент робився на концептуальній моделі системи та загальних принципах її роботи, у даній роботі зосереджено увагу на формальній математичній специфікації ключових елементів підходу. Зокрема, запропоновано формальну модель сценарію виконання місії, структуру прецеденту та організацію бази прецедентів, що дозволяє систематизувати накопичений досвід виконання типових завдань гетерогенними групами БПА.

У межах дослідження розроблено модель, орієнтовану на три базові типи апаратів – мікроквадрокоптери, середні мультикоптери та літакові БПА, що відрізняються своїми технічними характеристиками, стійкістю до умов середовища та функціональними можливостями. Модель спрямована на забезпечення ефективної координації при виконанні місій розвідки, спостереження та моніторингу, які потребують узгодженого розподілу ролей, оперативної зміни траєкторій та адаптації поведінки агентів.

У статті введено метрику подібності, що дає змогу визначати рівень відповідності між поточним станом середовища, параметрами апаратів та умовами виконання місії, зафіксованими у прецедентах. На її основі запропоновано алгоритм вибору релевантного сценарію з бази прецедентів та механізм його адаптації в реальному часі з використанням принципів підкріпленого навчання. Такий підхід забезпечує гнучке коригування сценарію у відповідь на зміни зовнішніх факторів та поведінки окремих агентів.

Результати дослідження демонструють, що формалізована сценарно-прецедентна модель створює передумови для побудови стійких, адаптивних та масштабованих систем координації гетерогенних БПА. Запропоновані рішення формують теоретичну основу для подальшого моделювання, експериментальної перевірки та порівняння з існуючими методами координації в умовах складних, динамічних та непередбачуваних середовищ.

Ключові слова: безпілотні апарати; гетерогенні ансамблі; багатоагентні системи; координація БПА; сценарно-прецедентний підхід; формальна модель; база прецедентів; адаптивні алгоритми; підкріплене навчання; розподілене управління; метрика подібності; автономні системи; розвідка; спостереження; моніторинг території.

V. G. SHERSTYUK

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Software and Technologies
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-9096-2582

S. A. SHCHERBANIUK

Postgraduate Student
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0001-5472-8019



FORMAL MODEL OF SCENARIO-PRECEDENT COORDINATION OF HETEROGENEOUS UNMANNED AERIAL VEHICLE ENSEMBLES AND ITS ADAPTATION ALGORITHM IN DYNAMIC ENVIRONMENTS

This article addresses the problem of coordinating heterogeneous ensembles of unmanned aerial vehicles (UAVs) in dynamic and uncertain environments using a scenario-precedent approach. Unlike previous studies, which primarily focused on the conceptual system model and general architectural principles, this work emphasizes the formal mathematical specification of the key components of the approach. In particular, a formal model of a mission execution scenario, a precedent structure, and the organization of a precedent base are proposed, enabling the systematic representation and reuse of accumulated experience in typical UAV group missions.

The study develops a model oriented toward three basic types of UAVs – micro quadcopters, medium multirotor UAVs, and fixed-wing aircraft – each characterized by distinct technical capabilities, environmental resilience, and functional roles. The model aims to support effective coordination during reconnaissance, observation, and territory monitoring missions, which require synchronized role distribution, rapid trajectory adjustment, and adaptive agent behavior.

The article introduces a similarity metric that allows estimating the correspondence between the current environmental state, UAV parameters, and mission execution conditions recorded in the precedent base. Based on this metric, an algorithm for selecting a relevant scenario from the precedent base is proposed, along with a real-time scenario adaptation mechanism leveraging reinforcement learning principles. This enables flexible scenario correction in response to changes in external conditions and individual agent behavior.

The results of the study demonstrate that the formalized scenario-precedent model provides a foundation for building robust, adaptive, and scalable coordination systems for heterogeneous UAV ensembles. The proposed solutions form the theoretical basis for further simulation studies, experimental validation, and comparative analysis with existing coordination methods in complex, dynamic, and uncertain environments.

Key words: *unmanned aerial vehicles; heterogeneous ensembles; multi-agent systems; UAV coordination; scenario-precedent approach; formal model; precedent base; adaptive algorithms; reinforcement learning; distributed control; similarity metric; autonomous systems; reconnaissance; observation; territory monitoring.*

Постановка проблеми

Координація гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів (БПА) є однією з ключових проблем сучасних автономних систем, особливо в умовах високої динамічності та невизначеності середовища. Гетерогенність таких ансамблів полягає у значних відмінностях між апаратами за технічними характеристиками, функціональними можливостями, енергетичними ресурсами, сенсорним обладнанням та рівнем автономності. У межах однієї місії мікроквадрокоптери можуть виконувати оперативну розвідку на малих висотах, мультикоптери – забезпечувати стабільне спостереження, а літакові БПА – здійснювати моніторинг великих територій на великих дистанціях. Узгоджена взаємодія таких різномірних агентів потребує гнучких механізмів розподілу завдань, адаптації планів та своєчасного реагування на зміни середовища.

У реальних умовах ефективна координація ускладнюється обмеженнями комунікацій, ймовірністю виникнення непередбачуваних перешкод, варіативністю погодних умов і необхідністю оперативної зміни маршрутів або ролей між агентами. У таких системах надзвичайно важливими стають здатність до швидкого прийняття рішень, адаптація до змінних умов та стійкість до відмов окремих елементів, що дозволяє зберегти працездатність усієї групи навіть у разі втрати одного або кількох БПА.

Традиційні централізовані, децентралізовані та гібридні підходи до управління демонструють певну ефективність, проте мають суттєві обмеження. Централізовані системи критично залежать від центрального вузла та можуть втрачати керованість у разі порушення зв'язку. Децентралізовані підходи забезпечують більшу стійкість, проте часто вимагають складних механізмів узгодження між агентами, що підвищує затримки та обчислювальні витрати. Стохастичні методи дозволяють досягти кращої адаптивності, але потребують великих обсягів даних і значних обчислювальних ресурсів, що обмежує їх застосування у часочутливих місіях. Детерміністичні методи, навпаки, можуть бути недостатньо гнучкими, оскільки залежать від попередньо визначених сценаріїв, які часто не враховують усіх можливих змін у середовищі.

Сценарно-прецедентний підхід, запропонований у попередньому етапі дослідження, демонструє значний потенціал завдяки можливості використовувати накопичений досвід виконання подібних місій і приймати рішення на основі аналогій. Він дозволяє скоротити час пошуку оптимального сценарію та забезпечує більш гнучку адаптацію до умов, що змінюються. Водночас для його практичної реалізації недостатньо лише концептуальних засад – необхідна формальна математична модель, яка чітко визначає структуру сценарію, форму прецеденту, правила їх індексації, критерії подібності та механізми вибору релевантного сценарію.

Потреба у такій формалізації зумовлена тим, що відсутність математично описаних компонентів унеможливає побудову ефективних алгоритмів, їх оптимізацію, валідацію та інтеграцію у реальні або симульовані багатоагентні системи. Осмислене та структуроване визначення сценарію та прецеденту є критично важливим

для забезпечення відтворюваності рішень, зниження обчислювальних витрат і підвищення точності вибору. Крім того, відсутні універсальні формальні методи оцінки подібності між умовами місії та даними з попереднього досвіду, що ускладнює автоматизований вибір сценарію.

Таким чином, проблема полягає у створенні цілісної, формально обґрунтованої та алгоритмічно придатної моделі сценарно-прецедентної координації гетерогенних ансамблів БПА. Така модель повинна забезпечувати структурований підхід до вибору та адаптації сценаріїв у режимі реального часу, враховуючи специфіку апаратів, типи місій, обмеження середовища та вимоги до оперативності роботи автономних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Координація гетерогенних багатоагентних систем, зокрема безпілотних апаратів (БПА), активно досліджується у сучасній науковій літературі, що зумовлено зростанням потреби у використанні автономних платформ у складних, динамічних та непередбачуваних умовах. Залежно від принципів організації взаємодії між агентами, підходи до керування поділяють на централізовані, децентралізовані та гібридні.

У централізованих системах усі рішення приймаються головним контролером, що дозволяє забезпечити високу узгодженість дій та глобальну оптимізацію процесів [4]. Проте така архітектура створює критичну залежність від єдиного центру, що може призводити до втрати керованості у разі відмови комунікацій або перевантаження центрального вузла. У динамічних середовищах це становить суттєвий ризик для безперервності виконання місії.

Децентралізовані методи дозволяють агентам приймати рішення локально на основі власного стану та інформації від сусідів, що значно підвищує стійкість системи до відмов окремих елементів [2]. У таких підходах широко застосовуються алгоритми консенсусу, розподіленого планування та поведінкового управління (behavior-based control), які забезпечують здатність рою адаптуватися до змін середовища без втрати цілісності [3]. Однак досягнення узгодженості між великою кількістю агентів потребує значної комунікаційної пропускної здатності та обчислювальних ресурсів, що може створювати затримки та обмежувати масштабованість системи.

Гібридні архітектури поєднують централізоване стратегічне планування з децентралізованим тактичним управлінням, що дозволяє збалансувати глобальну оптимізацію та локальну адаптацію [1]. Попри це, інтеграція різних рівнів управління в гетерогенних командах БПА залишається складним завданням через різні можливості апаратів, вимоги до синхронізації та обмеження зв'язку, особливо у місіях з високим рівнем динамічності.

Суттєвого розвитку в останні роки набули методи машинного та підкріпленого навчання, які показали ефективність у задачах автономної навігації, оптимізації траєкторій і розподілу ролей у командах БПА [11]. RL-підходи дозволяють системам адаптувати поведінку на основі зворотного зв'язку, проте залишаються обчислювально дорогими, чутливими до якості навчальних даних і часто не гарантують стабільної роботи в умовах різких змін середовища.

Паралельно набирають поширення методи прецедентного аналізу (case-based reasoning), які надають можливість використовувати накопичений досвід виконання місій для прийняття рішень у схожих ситуаціях [12]. CBR-підходи відзначаються інтерпретованістю, ефективністю та нижчими вимогами до обчислювальних ресурсів при виборі рішення. Проте більшість існуючих моделей не пропонує структурованої формальної моделі для застосування такого підходу саме в гетерогенних ансамблях БПА та не розглядає питання інтеграції прецедентів з адаптивними алгоритмами, що працюють у режимі реального часу.

Таким чином, аналіз наукових джерел засвідчує, що попри значні напрацювання у сфері централізованої, децентралізованої та гібридної координації, а також у використанні машинного навчання та прецедентних методів, все ще відсутня уніфікована формальна модель, яка б поєднувала ці підходи у цілісну систему сценарно-прецедентної координації гетерогенних БПА. Це підкреслює актуальність розробки математично обґрунтованої моделі та алгоритмів, що забезпечать ефективний вибір та адаптацію сценаріїв у реальному часі.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є розробка формальної моделі сценарно-прецедентної координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів та створення алгоритмів вибору й адаптації сценаріїв у динамічних умовах. Така модель має забезпечити систематизований підхід до використання накопиченого досвіду виконання місій та підвищити ефективність взаємодії між різними типами БПА у складних і невизначених середовищах. Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання:

1. Формалізувати структуру сценарію виконання місії, включаючи визначення початкових умов, цілей, послідовностей дій, обмежень та критеріїв успішності.
2. Розробити формальне представлення прецедентів, що охоплює контекст місії, параметри середовища, характеристик БПА та результати виконання завдань.
3. Створити модель бази прецедентів, яка забезпечує класифікацію, зберігання, індексацію та ефективний пошук релевантних записів.
4. Запропонувати метрику подібності між поточним станом середовища та прецедентами, що включає оцінку відповідності умов місії, характеристик агентів та очікуваних результатів.

5. Розробити алгоритм вибору релевантного сценарію на основі бази прецедентів із урахуванням параметрів гетерогенних апаратів і типу місії.

6. Створити адаптивний алгоритм корекції сценарію у реальному часі, що дозволяє коригувати дії БПА в умовах динамічних змін середовища з використанням механізмів підкріпленого навчання.

7. Визначити модель комунікації та розподілу завдань у гетерогенному ансамблі, яка забезпечує узгодженість дій і стійкість системи до відмов окремих елементів.

Виконання цих завдань дозволить сформувати цілісний формальний апарат сценарно-прецедентної координації та створить основу для подальших етапів моделювання та експериментального аналізу.

Викладення основного матеріалу дослідження

1. Формальна постановка задачі координації гетерогенних БПА

Гетерогенний ансамбль БПА визначимо як множину агентів:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}, \quad (1)$$

де кожен агент характеризується типом $t_i \in T$, технічними параметрами та набором доступних дій.

Множина типів БПА у даній роботі охоплює три категорії:

$$T = \{t_{micro}, t_{medium}, t_{wing}\}, \quad (2)$$

які відповідають мікроквадрокоптеру, середньому мультикоптеру та літаковому БПА.

Кожен агент описується вектором параметрів:

$$a_i = (t_i, v_i, r_i, \sigma_i), \quad (3)$$

де:

- v_i – максимальна швидкість,
- r_i – радіус дії,
- σ_i – сенсорні можливості.

Поточний стан середовища описується множиною змінних:

$$E = (e_1, e_2, \dots, e_k) \quad (4)$$

що включають погодні умови, наявність перешкод, характеристику території, рівень загрози тощо.

Завдання координації полягає у знаходженні стратегії дій:

$$\Sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots), \quad (5)$$

яка дозволяє агентам виконати поставлену місію типу $M \in \{\text{розвідка, спостереження, моніторинг}\}$.

2. Формальна модель сценарію

Перед викладенням формальної моделі сценарію доцільно зазначити, що сценарій у запропонованому підході розглядається не лише як послідовність дій, а як структурований опис взаємодії гетерогенного ансамблю БПА з динамічним середовищем. Формалізація сценарію дозволяє уніфікувати процес планування місій та створює основу для подальшого накопичення та повторного використання досвіду.

Сценарій визначимо як кортеж:

$$S = (E_0, G, \Sigma, C, R), \quad (6)$$

де:

- E_0 – початковий стан середовища,
- G – ціль місії,
- Σ – план/послідовність дій,
- C – обмеження (часові, енергетичні, просторові),
- R – результат виконання.

Для місій розвідки та спостереження сценарій часто містить:

- зону сканування,
- маршрут обльоту,
- частоту фіксації даних,
- правила зміни траєкторії.

Формалізований сценарій виступає базовим елементом для опису прецедентів, у яких зафіксовано результати виконання місій за конкретних умов. Це дозволяє перейти від статичного планування до сценарно-прецедентного використання накопиченого досвіду.

3. Формальна модель прецеденту

Прецедент – це опис попередньо виконаної місії у вигляді:

$$P = (S, E_{context}, A_{sets}, R_{eval}), \quad (7)$$

де:

- S – сценарій,
- $E_{context}$ – умови, у яких він був застосований,
- A_{set} – типи та параметри задіяних БПА,
- R_{eval} – оцінка результативності.

Це дозволяє зберігати досвід і повторно використовувати його для нових сценаріїв.

4. Структура бази прецедентів

Оскільки ефективність сценарно-прецедентного підходу визначається якістю накопиченого досвіду, необхідним є формальне представлення прецедентів та механізму їх зберігання. Це забезпечує можливість автоматизованого аналізу та вибору релевантних сценаріїв.

Базу прецедентів визначимо як множину:

$$M = (P_1, P_2, \dots, P_m). \quad (8)$$

Кожен прецедент містить:

- класифікацію місії;
- опис середовища;
- типи БПА;
- використані стратегії;
- показники успішності.

Структура бази орієнтована на пошук за ключовими параметрами:

- тип місії,
- подібність середовища,
- відповідність характеристик БПА.

Наявність бази прецедентів зумовлює потребу у кількісній оцінці відповідності між поточними умовами місії та умовами, зафіксованими у прецедентах. Саме для цього вводиться метрика подібності.

5. Метрика подібності

Метрика подібності відіграє ключову роль у процесі вибору сценарію, оскільки дозволяє перейти від якісного порівняння ситуацій до формалізованої процедури прийняття рішень.

Для реалізації вибору прецеденту потрібна функція подібності:

$$d(P, E, A) = (\alpha_1 d_{env} + \alpha_2 d_{mission} + \alpha_3 d_{agents}). \quad (9)$$

Компоненти метрики:

1. Подібність середовища

$$d_{env} = \|E_{context} - E_{current}\|. \quad (10)$$

2. Подібність типу місії

$$d_{mission} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (11)$$

якщо тип місії збігається – 0, інакше – 1.

3. Подібність апаратів

$$d_{agents} = \sum_i \omega_i \|a_i^{context} - a_i^{current}\|. \quad (12)$$

Коефіцієнти $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ задають вагу кожного критерію.

Отримані значення подібності використовуються як критерій для вибору найбільш релевантного сценарію з бази прецедентів, що забезпечує адаптацію системи до поточних умов.

6. Алгоритм вибору релевантного сценарію

Алгоритм вибору сценарію реалізує практичне застосування сценарно-прецедентного підходу, поєднуючи результати оцінювання подібності з механізмом прийняття рішень.

На основі метрики подібності здійснюється пошук найближчого прецеденту:

Алгоритм гарантує, що обраний сценарій:

- відповідає умовам місії,
- враховує можливості апаратів,
- має мінімальне відхилення від оптимальних умов попередніх виконань.

Однак навіть найбільш релевантний сценарій не гарантує оптимального виконання місії в умовах динамічного середовища, що обумовлює необхідність його подальшої адаптації у реальному часі.

7. Адаптивний алгоритм корекції сценарію у реальному часі

7.1. Модель підкріпленого навчання

```

1 Input: E_current, A_current, mission_type
2 best_match = None
3 min_distance = +∞
4
5 For each P in PrecedentBase:
6     d = similarity(P, E_current, A_current)
7     If d < min_distance:
8         min_distance = d
9         best_match = P
10
11 If min_distance > threshold:
12     best_match = adapt(P)
13
14 Return best_match.Scenario

```

Рис. 1. Псевдокод алгоритму пошуку найближчого прецеденту

У межах адаптивного вибору та корекції сценарію використовується модель підкріпленого навчання, яка дозволяє системі приймати рішення на основі зворотного зв'язку. Підкріплене навчання розглядає координацію гетерогенних БПА як процес взаємодії між агентом та середовищем, де кожен агент поступово навчається обирати оптимальні дії у відповідь на зміну умов місії.

Стан системи визначається як:

$$s_t = (E_t, A_t). \quad (13)$$

Це означає, що в момент часу t агент оцінює:

- E_t – поточний стан середовища, включаючи погодні умови, наявність перешкод, рівень радіозв'язку, динаміку об'єктів тощо
- A_t – внутрішній стан апарата, такий як координати, швидкість, заряд батареї, стан сенсорів, відхилення від маршруту.

Це дозволяє агенту сприймати як глобальні, так і локальні зміни, що впливають на виконання місії.

Дія:

$$a_t \in D. \quad (14)$$

Функція винагороди:

$$r_t = f(\text{достовірність даних, швидкість виконання, енергоспоживання}), \quad (15)$$

де r_t – винагорода за крок t

Мета агента:

$$\max_{\pi} E \left[\sum_t \gamma^t r_t \right]. \quad (16)$$

Формальне визначення завдання агента:

- π (policy) – стратегія, за якою агент вибирає дії
- $E[\cdot]$ – математичне очікування (середнє значення)
- $\sum_t \gamma^t r_t$ – сумарна винагорода, де γ – коефіцієнт дисконтування, який показує важливість майбутніх винагород.

Отже, агент намагається знайти таку політику поведінки, яка забезпечить максимальну сумарну користь за всю місію.

7.2. Процедура адаптації

```

1 While mission not completed:
2     s = observe_state()
3     a = select_action(π, Scenario)
4     execute(a)
5     r = evaluate()
6     update_policy(π, s, a, r)

```

Рис. 2. Псевдокод процедури адаптації

Це дозволяє підлаштовувати траєкторію, змінювати частоту збору даних і перебудовувати розподіл ролей між агентами.

8. Модель комунікації та розподілу завдань

Оскільки ансамбль є гетерогенним, ефективність сценарно-прецедентної координації визначається не лише правильним вибором сценарію, а й здатністю агентів узгоджувати свої дії під час виконання місії. Тому необхідною складовою запропонованої моделі є формалізація комунікації між БПА та механізму розподілу завдань, які забезпечують колективну узгодженість, мінімізують дублювання дій і підвищують стійкість системи до відмов.

Використовується модель кооперації:

$$A_i \leftrightarrow A_j : \Delta E, \Delta R. \quad (17)$$

Розподіл завдань визначається за критеріями:

- енергозапас,
- відстань до об'єкта,
- якість сенсорів.

Таким чином, модель комунікації та розподілу завдань забезпечує зв'язок між стратегічним рівнем (вибір сценарію за прецедентами) та тактичним рівнем (виконання локальних дій агентами). Вона також створює інформаційну основу для оперативної корекції сценарію: за рахунок оновлення станів агентів і обміну ключовими повідомленнями система може виявляти відхилення від плану та ініціювати адаптацію рішень у реальному часі.

9. Очікувані властивості моделі

Запропонована формальна модель забезпечує:

- масштабованість – можливість додавати нові типи БПА;
- стійкість – система продовжує працювати при відмові агентів;
- гнучкість – адаптація сценаріїв у режимі реального часу;
- швидкість – скорочення часу прийняття рішень завдяки готовим прецедентам;
- універсальність – модель можна застосувати до різних типів місій.

10. Підтвердження очікуваних властивостей моделі

Підтвердження очікуваних властивостей запропонованої моделі ґрунтується на її формальній структурі та принципах проектування. Модель сценарно-прецедентної координації сформульована у вигляді набору взаємопов'язаних абстракцій – стану системи, сценарію, прецеденту, дій агентів і механізмів адаптації, що дозволяє незалежно розширювати окремі компоненти без порушення загальної логіки управління. Така декомпозиція безпосередньо забезпечує масштабованість моделі, зокрема можливість додавання нових типів безпілотних апаратів і місій.

Стійкість системи до відмов підтверджується децентралізованим характером прийняття рішень та формалізованою моделлю комунікації і розподілу завдань, яка не передбачає єдиного критичного елемента управління. Навіть у разі втрати окремих агентів або каналів зв'язку сценарій може бути скоригований, а ролі – перерозподілені між доступними апаратами.

Гнучкість моделі впливає з використання адаптивного механізму корекції сценаріїв, формалізованого в межах моделі підкріпленого навчання. Наявність зворотного зв'язку між станом середовища та діями агентів забезпечує можливість оперативної перебудови поведінки ансамблю в режимі реального часу.

Швидкість прийняття рішень обґрунтовується використанням бази прецедентів і метрики подібності, що дозволяє здійснювати вибір сценарію на основі аналогій з раніше виконаними місіями, зменшуючи потребу у повному переплануванні.

Таким чином, формальні рішення, закладені в архітектуру моделі, узгоджуються з очікуваними властивостями, сформульованими в пункті 9, і підтверджують доцільність запропонованого підходу як теоретичної основи для подальшої реалізації та експериментальної перевірки.

Висновки

У даній роботі запропоновано формальну модель сценарно-прецедентної координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів, орієнтовану на виконання місій розвідки, спостереження та моніторингу території. Розроблена модель надає структуроване представлення сценаріїв, прецедентів і умов їх застосування, забезпечуючи систематизований підхід до використання накопиченого досвіду для прийняття рішень у нових або динамічних ситуаціях.

Було формалізовано ключові елементи системи: структуру сценарію, модель прецеденту, механізми класифікації та пошуку релевантних записів у базі прецедентів. Запропонована метрика подібності дозволяє визначати рівень відповідності між поточним станом середовища, параметрами БПА та даними з попередніх місій. На основі цього розроблено алгоритм вибору сценарію, який мінімізує відхилення від оптимальних умов, зафіксованих у прецедентах.

Окрему увагу приділено розробці адаптивного алгоритму корекції сценарію, що працює у режимі реального часу та використовує принципи підкріпленого навчання. Це забезпечує гнучкість системи та її здатність реагувати на непередбачувані зміни середовища. Модель комунікації та розподілу ролей між агентами дозволяє ефективно

узгоджувати дії БПА різних типів, підвищуючи стійкість системи до відмов та покращуючи загальну продуктивність місії.

Запропонована формальна модель створює цілісну теоретичну основу для подальшої реалізації алгоритмічних рішень, а також для проведення експериментальної перевірки ефективності сценарно-прецедентних методів у моделюванні та реальних застосуваннях. Подальші дослідження будуть спрямовані на інтеграцію розроблених алгоритмів у симуляційне середовище та проведення порівняльного аналізу з існуючими підходами до координації гетерогенних БПА.

Список використаної літератури

1. Гусєв В. М., Шерстюк В. Г., Левківський Р. М., Сокол І. В. Модель сценарно-прецедентного керування спільним рухом великих гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів. *Проблеми інформаційних технологій*. 2019. № 25. С. 4–17.
2. Артющин Л. Аналіз перспектив реалізації групового застосування груп безпілотних літальних апаратів. *Загальні проблеми оборони і автоматизації*. 2023. № 19. С. 42–48.
3. Романюк В. А. Методологічні основи синтезу системи управління групою (роем) безпілотних літальних апаратів. *Сучасні інформаційні системи та технології*. 2025. № 2. С. 156–172.
4. Компанієць О. М., Ключніков І. М., Касаткін М. В. Моделювання синергетичного безконфліктного руху рою БПЛА метаевристичними підходами. *Випробування та сертифікація*. 2024. № 3. С. 40–47.
5. Koval D. Метод технічного обґрунтування вимог до виявлення-розділення груп безпілотних літальних апаратів. *Сучасні інформаційні технології*. 2020. № 3. С. 33–38.
6. Самойленко В. М. Обґрунтування застосування автономних безпілотних літальних апаратів, оснащених оптико-електронною системою навігації, для виконання завдань підрозділами Національної гвардії України. *Чесць і Закон*. 2023. № 4. С. 83–91.
7. Guo J., Cao Y. Centralized control strategies for UAV swarm coordination: A survey. *IEEE Signal Processing Letters*. 2020. Vol. 27. P. 1345–1349.
8. Olfati-Saber, R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2006. Vol. 41. P. 483–495.
9. Brambilla M., Ferrante E., Birattari M., Dorigo M. Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective. *Swarm Intelligence*. 2013. Vol. 7. P. 1–41.
10. Yan Z., Jouandeau N., Cherif A. A. A survey and analysis of multi-robot coordination. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2013. Vol. 10.
11. Zhang K., Yang Z., Basar T. Multi-agent reinforcement learning: A selective overview. *arXiv*. 2021. P. 1–73 URL: <https://arxiv.org/pdf/1911.10635> (дата звернення 18.11.2025).
12. Rahman M., Sarkar N. I., Lutui R. A Survey on Multi-UAV Path Planning: Classification, Algorithms, Open Research Problems, and Future Directions. *Drones*. 2025. P. 1–32. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/9/4/263> (дата звернення 22.11.2025).

References

1. Husiev V. M., Sherstiuk V. H., Levkivskiy R. M., Sokol I. V. (2019) Model stsenarno-pretседentnoho keruvannya spilnym rukhom velykykh heterohennykh ansambliv bezpilotnykh aparativ [Scenario-precedent model for coordinated movement of large heterogeneous UAV ensembles]. *Problemy informatsiynykh tekhnolohii*, No. 25, pp. 4–17. [in Ukrainian].
2. Artiushyn L. (2023) Analiz perspektiv realizatsii hrupovoho zastosuvannya bezpilotnykh litalnykh aparativ [Analysis of prospects for group application of unmanned aerial vehicles]. *Zahalni problemy obrony i avtomatyzatsii*, No. 19, pp. 42–48. [in Ukrainian].
3. Romaniuk V. A. (2025) Metodolohichni osnovy syntezy systemy upravlinnia hrupoju (roiem) bezpilotnykh litalnykh aparativ [Methodological foundations of synthesizing a control system for a UAV swarm]. *Suchasni informatsiini systemy ta tekhnolohii*, No. 2, pp. 156–172. [in Ukrainian].
4. Kompaniets O. M., Kliushnikov I. M., Kasatkin M. V. (2024) Modeliuvannya synerhetychnoho bezkonfliktnoho rukhu roiu BPLA metaevrystychnymy pidkhodamy [Modeling synergistic conflict-free UAV swarm movement using metaheuristic approaches]. *Vyprobuvannya ta sertyfikatsiia*, No. 3, pp. 40–47. [in Ukrainian].
5. Koval D. (2020) Metod tekhnichnoho obgruntuvannya vymoh do vyavlennia-rozdilennia hrup bezpilotnykh litalnykh aparativ [Method for technical justification of requirements for detection and separation of UAV groups]. *Suchasni informatsiini tekhnolohii*, No. 3, pp. 33–38. [in Ukrainian].
6. Samoilenko V. M. (2023) Obgruntuvannya zastosuvannya avtonomnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ, osnashchenykh optyko-elektronnoiu systemoiu navihatsii, dlia vykonannya zavdan pidrozdilamy Natsionalnoi hvardii

Ukrainy [Justification of the use of autonomous UAVs equipped with an optoelectronic navigation system for National Guard missions]. Chest i Zakon, No. 4, pp. 83–91. [in Ukrainian].

7. Guo J., Cao Y. (2020) Centralized control strategies for UAV swarm coordination: A survey. IEEE Signal Processing Letters, Vol. 27, pp. 1345–1349.

8. Olfati-Saber R. (2006) Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 41, pp. 483–495.

9. Brambilla M., Ferrante E., Birattari M., Dorigo M. (2013) Swarm robotics: A review from the swarm engineering perspective. Swarm Intelligence, Vol. 7, pp. 1–41.

10. Yan Z., Jouandeau N., Cherif A. A. (2013) A survey and analysis of multi-robot coordination. International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 10.

11. Zhang K., Yang Z., Basar T. (2021) Multi-agent reinforcement learning: A selective overview. arXiv preprint, pp. 1–73. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1911.10635> (Accessed: 18 November 2025).

12. Rahman M., Sarkar N. I., Lutui R. (2025) A survey on multi-UAV path planning: Classification, algorithms, open research problems, and future directions. Drones, pp. 1–32. Available at: <https://www.mdpi.com/2504-446X/9/4/263> (Accessed: 22 November 2025).

Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

УДК 004.41

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.1.54>

О. М. ШИБКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних наук, інформаційних технологій
та прикладної математики
ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0000-0001-5894-0642

С. Ю. ШАФОРЕНКО

викладач кафедри інформаційних технологій
ПЗВО «Харківський технологічний університет «ШАГ»
ORCID: 0009-0009-6677-8548

А. В. АВРЯТА

викладач кафедри інформаційних технологій
ПЗВО «Харківський технологічний університет «ШАГ»
ORCID: 0000-0002-5100-2298

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДОЛОГІЙ ПРОЄКТУВАННЯ ІС: UML, BPMN, ARCHIMATE

Дослідження спрямоване на комплексний порівняльний аналіз трьох провідних методологій проєктування інформаційних систем – UML (Unified Modeling Language), BPMN (Business Process Model and Notation) та ArchiMate – з метою виявлення їхніх функціональних можливостей, технологічних переваг, обмежень та оптимальних сфер застосування в сучасній практиці розробки програмного забезпечення та моделювання архітектури підприємства. **Наукова новизна.** Вперше здійснено систематизований порівняльний аналіз найновіших досліджень щодо автоматизації UML-моделювання з використанням штучного інтелекту, розширень BPMN для специфічних галузевих застосувань та методологічних підходів ArchiMate до оцінювання стійкості систем. Запропоновано класифікаційну модель критеріїв вибору методології проєктування залежно від рівня абстракції, складності системи та галузевої специфіки проєкту. **Результати.** Встановлено, що UML залишається найбільш універсальною мовою для детального технічного моделювання програмних систем, BPMN демонструє переваги в описі бізнес-процесів та їх автоматизації, тоді як ArchiMate забезпечує найвищий рівень інтеграції між бізнес-архітектурою, додатками та технологічною інфраструктурою. Виявлено тенденції інтеграції штучного інтелекту в автоматизацію UML-діаграм, розширення функціоналу BPMN для промислового інтернету речей та застосування ArchiMate для аналізу стійкості складних систем. **Висновки.** Результати дослідження підтверджують, що вибір методології проєктування має базуватися на специфічних цілях проєкту: UML оптимальний для програмної інженерії та об'єктно-орієнтованого аналізу, BPMN – для моделювання та оптимізації бізнес-процесів, ArchiMate – для комплексного архітектурного планування підприємства. Перспективи подальших досліджень включають розробку гібридних методологій та інтелектуальних систем підтримки вибору нотацій моделювання.

Ключові слова: UML, BPMN, ArchiMate, моделювання інформаційних систем, архітектура підприємства.

О. М. SHYBKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Computer Science,
Information Technology and Applied Mathematics
SEI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture"
of Ukrainian State University of Science and Technologies
ORCID: 0000-0001-5894-0642

S. YU. SHAFORENKO

Lecturer at the Department of Information Technology
PHEI "Kharkiv University of Technology "STEP"
ORCID: 0009-0009-6677-8548



A. V. AVRIATA

Lecturer at the Department of Information Technology

PHEI "Kharkiv University of Technology "STEP"

ORCID: 0000-0002-5100-2298

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN IS DESIGN METHODOLOGIES: UML, BPMN, ARCHIMATE

*The research goal is to perform a thorough comparative analysis of 3 top information systems design methods namely UML (Unified Modeling Language), BPMN (Business Process Model and Notation), ArchiMate to discover their functional capability, technological advantage, drawback, and the best application to the current software development engaged and enterprise architecture modeling. The investigation considers latest developments of AI-driven UML automation, BPMN extensions for special industrial purposes, ArchiMate approaches for system resilience evaluation. **Scientific novelty.** For the first time, a systematized comparative analysis of the latest research on UML modeling automation using artificial intelligence, BPMN extensions for specific industry applications, and ArchiMate methodological approaches to systems resilience assessment have been conducted. A classification model of design methodology selection criteria has been proposed based on abstraction level, system complexity, and project-specific industry requirements. The research establishes novel connections between emerging technologies such as visual question answering techniques for diagram complexity analysis and role-based BPMN extensions. **Results.** It has been established that UML remains the most universal language for detailed technical modeling of software systems, BPMN demonstrates advantages in business process description and automation, while ArchiMate provides the highest level of integration between business architecture, applications, and technological infrastructure. Trends have been identified in the integration of artificial intelligence into UML diagram automation, expansion of BPMN functionality for industrial Internet of Things applications, and application of ArchiMate for analyzing the resilience of complex systems. The research shows how machine-learning capability, formal verification paradigms and extensions to these are increasingly incorporated into contemporary methodologies. **Conclusions.** The results of the research support the conclusion that the selection of design methodology depends on the desired project goals: the best choice of a UML (unified process language) for software engineering and object-oriented analysis, BPMN (business process modeling and optimization) and ArchiMate (enterprise architecture) for enterprises. Future research perspectives are the development of methodologies for hybrid approaches and intelligent support systems in the selection of modeling notations depending on project characteristics and organizational requirements.*

Key words: UML, BPMN, ArchiMate, information systems modeling, enterprise architecture

Постановка проблеми

Сучасний стан практики проектування інформаційних систем характеризується динамічним зростанням складності архітектурних рішень що обумовлює необхідність інтеграції різнорідних програмних та апаратних компонентів в умовах підвищених вимог до якості документування проєктних рішень на всіх етапах життєвого циклу розробки. У контексті перманентної цифрової трансформації бізнес-процесів підприємств різних галузей економіки актуалізується критична потреба у формалізованих методологіях концептуального моделювання, які б забезпечували ефективну комунікацію між зацікавленими сторонами проєкту, підтримували множинні рівні абстракції від бізнес-процесів до технічної реалізації та уможливлювали автоматизацію процесів верифікації та валідації прийнятих проєктних рішень відповідно до встановлених архітектурних обмежень та якісних атрибутів систем. Три провідні методології концептуального моделювання – UML (Unified Modeling Language) для об'єктно-орієнтованого проектування програмних систем, BPMN (Business Process Model and Notation) для формалізації бізнес-процесів та ArchiMate для опису корпоративної архітектури підприємства – сформувалися як міжнародні стандарти де-факто в різних предметних сферах проектування інформаційних систем, проте їхнє систематичне порівняльне дослідження залишається науково актуальним з огляду на постійний еволюційний розвиток функціональних можливостей нотацій, появу нових профільних розширень для специфічних предметних областей та активну інтеграцію з технологіями штучного інтелекту і машинного навчання для автоматизації процесів моделювання та аналізу якості архітектурних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження в галузі методологій проектування інформаційних систем демонструють інтенсивний розвиток автоматизованих підходів та розширення функціональних можливостей традиційних нотацій моделювання.

Yang X., Cui R., Xie X. [1, с. 145] представили AI-фреймворк для автоматизованої генерації UML-діаграм класів та послідовностей із текстових специфікацій вимог, що скорочує час проектування інформаційних систем та мінімізує помилки моделювання компонентів.

Wang C., Wang B., Liang P., Liang J. [2, с. 112710] дослідили застосування GPT для автоматизованого оцінювання якості UML-діаграм, виявивши перспективи верифікації коректності проєктних рішень інформаційних систем.

Shehzadi N., Ferzund J., Fatima R., Riaz A. [3, с. 23] запропонували технології візуального відповідання на запитання для кількісного аналізу складності UML-діаграм класів та прогнозування проблем у розробці на етапі проектування інформаційних систем.

Benkeltoum N. [4, с. 2] продемонстрував ефективність ArchiMate для документування архітектури інформаційних систем підприємства та візуалізації взаємозв'язків між бізнес-процесами, додатками та технологічною інфраструктурою.

Skouti T., Seiger R., Furrer F. J., Strahninger S. [5, с. 1376] створили розширення BPMN із концепцією ролей (RBPMN), що підвищує виразність моделювання організаційних структур при проектуванні інформаційних систем.

Zhang H., Matsubara Y. [6, с. 328] розробили ArchiMate-підхід для оцінювання стійкості складних інформаційних систем через аналіз критичних залежностей між компонентами на етапі проектування.

Dias M. H. B. [7, с. 4457] виявив синергетичні ефекти інтеграції BPMN та UML для різних рівнів деталізації проектної документації інформаційних систем.

Ben Hassen M., Gargouri F. [8, с. 3] запропонували методологію EM-BPMN4SBP для специфікації вимог конфіденційності та безпеки даних у чутливих бізнес-процесах при проектуванні інформаційних систем.

Kräuter T., Rutle A., König H., Lamo Y. [9, с. 5] розробили формалізацію BPMN через системи трансформації графів вищого порядку для математично строгої верифікації коректності моделей бізнес-процесів на етапі проектування інформаційних систем.

Kang G., Cheng H., Liu J., Wen Y., Peng J. [10, с. 814] представили розширення BPMN4IoT для моделювання промислового інтернету речей, адаптуючи нотацію до розподілених систем із потоками даних реального часу в архітектурі інформаційних систем.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження полягає у здійсненні систематичного порівняльного аналізу методологій UML, BPMN та ArchiMate з точки зору їхнього застосування в проектуванні інформаційних систем, виявлення виразних можливостей, технологічних характеристик, сфер оптимального застосування та перспектив інтеграції з сучасними технологіями автоматизації проектування.

Викладення основного матеріалу дослідження

UML являє собою стандартизовану мову візуального моделювання для специфікації та документування артефактів програмних систем. Yang X., Cui R., Xie X. [1, с. 146] реалізують AI-генерацію діаграм через лексичний аналіз вимог, семантичну ідентифікацію класів та синтезування діаграм із дотриманням UML 2.5. Wang C., Wang B., Liang P., Liang J. [2, с. 112711] демонструють точність GPT-систем 87 % у ідентифікації антипатернів проектування. Shehzadi N., Ferzund J., Fatima R., Riaz A. [3, с. 24] визначають метрики складності через кардинальність класів, глибину ієрархії, щільність зв'язків та циклічні залежності для ідентифікації проблемних фрагментів архітектури. UML охоплює структурні діаграми (класів, компонентів, розгортання) та поведінкові діаграми (послідовностей, діяльності).

BPMN спеціалізується на моделюванні бізнес-процесів. RBPMN Skouti T., Seiger R., Furrer F. J., Strahninger S. [5, с. 1378] специфікує відповідальності та повноваження учасників для міжорганізаційних workflows. EM-BPMN4SBP Ben Hassen M., Gargouri F. [8, с. 4] інтегрує вимоги безпеки через стереотипи для конфіденційних даних та механізмів аутентифікації. Kräuter T., Rutle A., König H., Lamo Y. [9, с. 7] формалізують BPMN для верифікації досяжності станів, відсутності дедлоків та живості процесів. BPMN4IoT Kang G., Cheng H., Liu J., Wen Y., Peng J. [10, с. 816] адаптує нотацію для фізичних пристроїв, сенсорних потоків та темпоральних обмежень Індустрії 4.0. Dias M. H. B. [7, с. 4459] комбінує BPMN для бізнес-процесів із UML для програмних компонентів, забезпечуючи трасованість від бізнес-рівня до імплементації.

ArchiMate моделює архітектуру підприємства. Benkeltoum N. [4, с. 3] візуалізує взаємозв'язки між стратегічними цілями, процесами та технологічними рішеннями. Zhang H., Matsubara Y. [6, с. 329] оцінюють стійкість через матриці залежностей та топологічний аналіз графів для ризиків каскадних відмов. ArchiMate структурує архітектуру у три шари: бізнес-шар, шар додатків, технологічний шар для аналізу впливу рішень на бізнес-цілі.

Для систематизації застосування методологій у різних фазах проектування інформаційних систем представлено порівняльну таблицю їхніх характеристик.

Як свідчить таблиця 1, методології суттєво відрізняються за рівнем деталізації проектування інформаційних систем, формальністю та можливостями автоматичного виконання моделей, що обумовлює їх застосування для різних фаз життєвого циклу проектування інформаційних систем.

Для візуалізації інтеграції методологій у процесі проектування інформаційних систем представлено концептуальну модель їх застосування на різних етапах.

Як видно з рисунка 1, трирівнева модель інтеграції методологій забезпечує послідовну трасованість у проектуванні інформаційних систем від стратегічного бізнес-рівня через моделювання процесів до технічного

Таблиця 1

**Порівняльний аналіз застосування методологій UML, BPMN та ArchiMate
у проєктуванні інформаційних систем**

Характеристика	UML	BPMN	ArchiMate
Рівень проєктування	Детальне технічне проєктування компонентів	Проєктування бізнес-процесів	Стратегічне архітектурне проєктування
Фокус моделювання	Програмні класи та компоненти ІС	Потоки операцій та події ІС	Цілісна архітектура підприємства
Підтримка виконання	Генерація коду з моделей	Трансформація в BPEL	Концептуальне планування
Автоматизація проєктування	AI-генерація діаграм	Формальна верифікація моделей	Аналіз стійкості архітектури
Типові артефакти проєктування	Діаграми класів, компонентів, послідовностей	Діаграми процесів, оркестрації	Діаграми шарів архітектури
Інтеграція в SDLC	Аналіз, проєктування, реалізація	Моделювання вимог, проєктування	Попереднє проєктування, планування

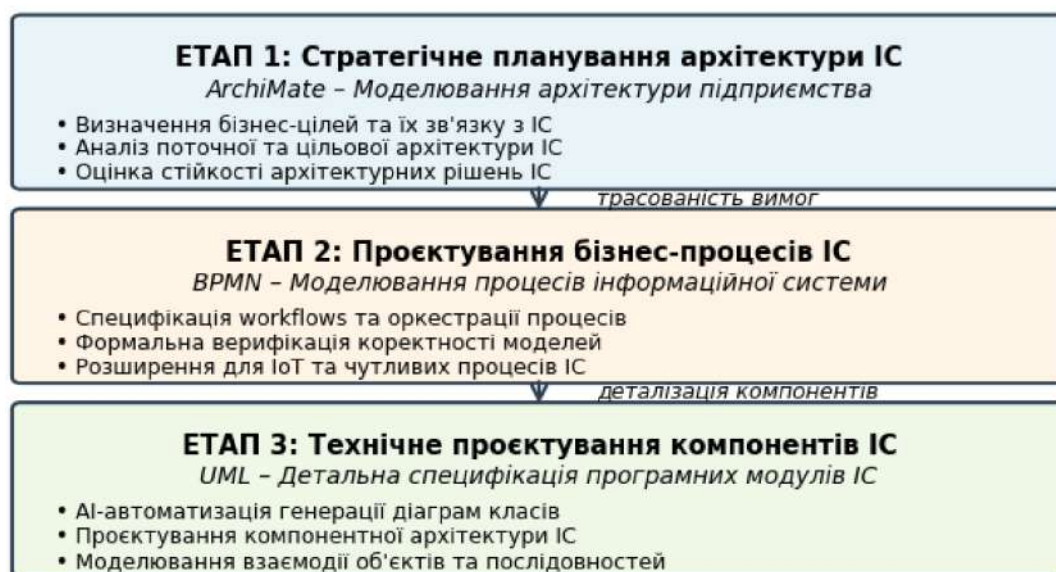


**Рис. 1. Модель інтеграції методологій UML, BPMN та ArchiMate
у процесі проєктування інформаційних систем**

Джерело: авторська розробка в Google Colab

проєктування компонентів, де кожна методологія оптимально застосовується на відповідному етапі проєктування інформаційної системи.

AI-автоматизація UML-моделювання забезпечує приріст продуктивності на 40–60 % Yang X., Cui R., Xie X. [1, с. 147], однак вимагає експертної валідації для складних архітектурних патернів. Wang C., Wang B., Liang P., Liang J. [2, с. 112712] виявляють обмеження великих мовних моделей у семантичній верифікації для високоспецифічних областей. Shehzadi N., Ferzund J., Fatima R., Riaz A. [3, с. 25] встановлюють кореляцію між метриками складності UML-діаграм та трудомісткістю імплементації для прогностичного планування проєктів.

RBPMN Skouti T., Seiger R., Furrer F. J., Strahninger S. [5, с. 1380] забезпечує моделювання динамічного розподілу відповідальностей для адаптивних систем. EM-BPMN4SBP Ben Hassen M., Gargouri F. [8, с. 5] інтегрує вимоги безпеки для ідентифікації вразливостей. Формалізація BPMN Kräuter T., Rutle A., König H., Lamo Y. [9, с. 9] забезпечує генерацію тестових сценаріїв із повним покриттям. BPMN4IIoT Kang G., Cheng H., Liu J., Wen Y., Peng J. [10, с. 818] моделює асинхронні архітектури для промислового інтернету речей.

Benkeltoom N. [4, с. 4] демонструє ArchiMate для трасування зв'язків між технологічними рішеннями та бізнес-результатами. Zhang H., Matsubara Y. [6, с. 330] розробляють метрики стійкості для кількісного оцінювання ризиків відмови. Dias M. H. B. [7, с. 4461] аргументує, що гібридний підхід BPMN-UML забезпечує трасованість вимог від бізнес-рівня до імплементації.

Висновки

Проведений порівняльний аналіз методологій UML, BPMN та ArchiMate підтверджує їхню комплементарність у проєктуванні інформаційних систем залежно від специфічних фаз та цілей проєктування.

UML залишається найбільш універсальною мовою для технічного проєктування програмного забезпечення інформаційних систем, забезпечуючи спектр діаграм від високорівневих концептуальних моделей до

низькорівневих специфікацій компонентів. AI-інтеграція демонструє приріст продуктивності проєктування на 40–60 %, проте вимагає експертної валідації складних архітектурних патернів.

BPMN оптимальний для проєктування бізнес-процесів інформаційних систем завдяки інтуїтивній нотації та трансформації в виконувани специфікації BPEL. Розширення для промислового інтернету речей (BPMN4IIoT) та чутливих процесів (EM-BPMN4SBP) адаптують методологію до специфічних галузевих застосувань. Формалізація через системи трансформації графів забезпечує математично строго верифікацію коректності проєктних моделей процесів.

ArchiMate забезпечує найвищий рівень інтеграції між бізнес-архітектурою, додатками та технологічною інфраструктурою, дозволяючи створювати цілісне представлення архітектури підприємства. Метрики стійкості на основі топологічного аналізу графів залежностей дозволяють кількісно оцінювати ризики відмови інформаційних систем на етапі проєктування.

Гібридні підходи, що комбінують методології на відповідних рівнях абстракції (ArchiMate для стратегічного планування, BPMN для процесів, UML для технічної специфікації), демонструють найбільшу ефективність для складних проєктів інформаційних систем. Перспективи досліджень включають розробку інтелектуальних систем підтримки вибору методології, створення уніфікованих репозиторіїв для трасованості між нотаціями та застосування формальних методів верифікації архітектурних моделей інформаційних систем.

Список використаної літератури

1. Yang X., Cui R., Xie X. AI-Driven Automated UML Modeling Framework Design and Practice. 2025 IEEE 5th International Conference on Software Engineering and Artificial Intelligence (SEAI). 2025. P. 144–148. DOI: <https://doi.org/10.1109/seai65851.2025.11108780> URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11108780>
2. Wang C., Wang B., Liang P., Liang J. Assessing UML diagrams by GPT: Implications for education. *Journal of Systems and Software*. 2026. Vol. 234. Art. 112709. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2025.112709> URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0164121225003784>
3. Shehzadi N., Ferzund J., Fatima R., Riaz A. Automatic Complexity Analysis of UML Class Diagrams Using Visual Question Answering (VQA) Techniques. *Software*. 2025. Vol. 4, no. 4. Art. 22. DOI: <https://doi.org/10.3390/software4040022> URL: <https://www.mdpi.com/2674-113X/4/4/22>
4. Benkeltoum N. Modelling using ArchiMate language: A case study. *Journal of Information Technology Teaching Cases*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1177/20438869251349223> URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/20438869251349223>
5. Skouti T., Seiger R., Furrer F. J., Strahringer S. RBPMN: the value of roles for business process modeling. *Software and Systems Modeling*. 2024. Vol. 23, no. 6. P. 1375–1406. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10270-024-01202-z> URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10270-024-01202-z>
6. Zhang H., Matsubara Y. ArchiMate-Based System of Systems Resilience Evaluation Approach. *Systems*. 2025. Vol. 13, no. 5. Art. 327. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems13050327> URL: <https://www.mdpi.com/2079-8954/13/5/327>
7. Dias M. H. B. Gerenciamento de processos de negócios: estudo de caso da integração entre BPMN e UML. *International Journal of Scientific Management and Tourism*. 2023. Vol. 9, no. 7. P. 4456–4476. DOI: <https://doi.org/10.55905/ijsmvtv9n7-025> URL: <https://ojs.scientificmanagementjournal.com/ojs/index.php/smj/article/view/658>
8. Ben Hassen M., Gargouri F. EM-BPMN4SBP: a BPMN extension methodology for sensitive business process specification. *Journal of Modelling in Management*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1108/jm2-06-2024-0185> URL: <https://www.emerald.com/jm2/article-abstract/doi/10.1108/JM2-06-2024-0185/1268851/EM-BPMN4SBP-a-BPMN-extension-methodology-for?redirectedFrom=fulltext>
9. Kräuter T., Rutle A., König H., Lamo Y. A higher-order transformation approach to the formalization and analysis of BPMN using graph transformation systems. *Logical Methods in Computer Science*. 2024. Vol. 20, iss. 4. DOI: [https://doi.org/10.46298/lmcs-20\(4:4\)2024](https://doi.org/10.46298/lmcs-20(4:4)2024) URL: <https://lmcs.episciences.org/14410>
10. Kang G., Cheng H., Liu J., Wen Y., Peng J. Business Process Modeling for Industrial Internet Application via BPMN Extension. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2025. Vol. 22. P. 813–829. DOI: <https://doi.org/10.1109/tase.2024.3354929> URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10483056>

References

1. Yang, X., Cui, R., & Xie, X. (2025). AI-Driven Automated UML Modeling Framework Design and Practice. In *2025 IEEE 5th International Conference on Software Engineering and Artificial Intelligence (SEAI)* (pp. 144–148). doi: 10.1109/SEAI65851.2025.11108780 Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/11108780> [in English].
2. Wang, C., Wang, B., Liang, P., & Liang, J. (2026). Assessing UML diagrams by GPT: Implications for education. *Journal of Systems and Software*, 234, Article 112709. doi: 10.1016/j.jss.2025.112709 Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0164121225003784> [in English].

3. Shehzadi, N., Ferzund, J., Fatima, R., & Riaz, A. (2025). Automatic Complexity Analysis of UML Class Diagrams Using Visual Question Answering (VQA) Techniques. *Software*, 4 (4), Article 22. doi: 10.3390/software4040022 Retrieved from <https://www.mdpi.com/2674-113X/4/4/22> [in English].
4. Benkeltoum, N. (2025). Modelling using ArchiMate language: A case study. *Journal of Information Technology Teaching Cases*. doi: 10.1177/20438869251349223 Retrieved from <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/20438869251349223> [in English].
5. Skouti, T., Seiger, R., Furrer, F. J., & Strahringer, S. (2024). RBPMN: the value of roles for business process modeling. *Software and Systems Modeling*, 23 (6), 1375–1406. doi: 10.1007/s10270-024-01202-z Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s10270-024-01202-z> [in English].
6. Zhang, H., & Matsubara, Y. (2025). ArchiMate-Based System of Systems Resilience Evaluation Approach. *Systems*, 13(5), Article 327. doi: 10.3390/systems13050327 Retrieved from <https://www.mdpi.com/2079-8954/13/5/327> [in English].
7. Dias, M. H. B. (2023). Gerenciamento de processos de negócios: estudo de caso da integração entre BPMN e UML. *International Journal of Scientific Management and Tourism*, 9(7), 4456–4476. doi: 10.55905/ijsmtnv9n7-025 Retrieved from <https://ojs.scientificmanagementjournal.com/ojs/index.php/smj/article/view/658> [in Portuguese].
8. Ben Hassen, M., & Gargouri, F. (2025). EM-BPMN4SBP: a BPMN extension methodology for sensitive business process specification. *Journal of Modelling in Management*. doi: 10.1108/JM2-06-2024-0185 Retrieved from <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JM2-06-2024-0185/full/html> [in English].
9. Kräuter, T., Rutle, A., König, H., & Lamo, Y. (2024). A higher-order transformation approach to the formalization and analysis of BPMN using graph transformation systems. *Logical Methods in Computer Science*, 20(4), Article 4. doi: 10.46298/lmcs-20(4:4)2024 Retrieved from <https://lmcs.episciences.org/14410> [in English].
10. Kang, G., Cheng, H., Liu, J., Wen, Y., & Peng, J. (2025). Business Process Modeling for Industrial Internet Application via BPMN Extension. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 22, 813–829. doi: 10.1109/TASE.2024.3354929 Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/10483056> [in English].

Дата першого надходження статті до видання: 13.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

О. М. ШУШУРА

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри цифрових технологій в енергетиці
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-3200-720X

К. В. НОВИЦЬКИЙ

магістр кафедри цифрових технологій в енергетиці
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0002-5000-1397

В. О. ІВАНОВ

магістр кафедри цифрових технологій в енергетиці
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0002-2498-5628

АВТОМАТИЧНЕ РЕЗЮМУВАННЯ НАУКОВИХ ДОКУМЕНТІВ НА ОСНОВІ МОДЕЛЕЙ-ТРАНСФОРМЕРІВ

Зростання обсягів наукової літератури актуалізує розробку ефективних методів автоматичної генерації стислих резюме. Традиційні підходи стикаються з обмеженням контекстного вікна, що робить неможливим безпосередню обробку документів довжиною понад кілька тисяч токенів.

Метою даної роботи є розробка гібридного методу автоматичного резюмування для узагальнення документів, які перевищують стандартні обмеження розміру контекстного вікна моделей-трансформерів.

Розроблений гібридний метод поєднує екстрактивні та абстрактивні методи резюмування для ефектвної обробки документів довільної довжини. Для екстрактивної фази була використана модель Sentence-BERT, з метою отримати семантичні векторні представлення речень, що дозволило ідентифікувати найбільш важливі частини тексту. На відміну від статистичних методів, Sentence-BERT захоплює глибинний семантичний зміст незалежно від лексичного складу. Наступна фаза методу видаляє семантичні дублікати за допомогою косинусної подібності, що забезпечує компактність проміжного представлення. Метод ідентифікує як точні дублікати, так і перефразування, створюючи компактне резюме. Фаза абстрактивної генерації виконується з використанням моделі BART-large-CNN, що поєднує двонаправлене кодування та авторегресивну генерацію. Це забезпечує створення зв'язних резюме з власними формулюваннями моделі, здатність до перефразування та об'єднання інформації з різних частин документу.

Розроблено програмне забезпечення для реалізації методу згідно з SOLID принципами, забезпечуючи модульність та можливість розширення системи. Проведено порівняльне дослідження розробленого методу з чотирма категоріями базових підходів і спеціалізованою моделлю яка має розширене вікно контексту LongT5. Оцінка на вибірці з наукових статей з arXiv показала, що запропонований метод краще показує себе аніж традиційні методи та працює на рівні з LongT5, використовуючи при цьому стандартну модель BART-large-CNN. Метод був застосований без додаткового перед-навчання, що знижує обчислювальні вимоги.

Ключові слова: резюмування тексту, обробка природньої мови, моделі трансформери, машинне навчання, інформаційні системи.

О. М. SHUSHURA

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Digital Technologies in Energy
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0003-3200-720X



K. V. NOVYTSKYI

Master at the Department of Digital Technologies in Energy
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0009-0007-2508-4350

V. O. IVANOV

Master at the Department of Digital Technologies in Energy
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0009-0002-2498-5628

AUTOMATIC SUMMARISATION OF SCIENTIFIC DOCUMENTS BASED ON TRANSFORMER-MODELS

The rapid growth of scientific literature highlights the need for effective methods of automatic summary generation. Traditional approaches face limitations imposed by fixed context windows, which makes the direct processing of documents longer than several thousand tokens impractical.

The aim of this work is to develop a hybrid automatic summarization method for processing documents that exceed the standard context window limitations of transformer-based models.

The proposed hybrid method combines extractive and abstractive summarization techniques to efficiently handle documents of arbitrary length. In the extractive phase, the Sentence-BERT model is employed to obtain semantic vector representations of sentences, enabling the identification of the most informative parts of the text. Unlike statistical methods, Sentence-BERT captures deep semantic meaning regardless of lexical variation. The subsequent phase removes semantic duplicates using cosine similarity, ensuring the compactness of the intermediate representation. The method identifies both exact duplicates and paraphrases, producing a concise intermediate summary. The abstractive generation phase is performed using the BART-large-CNN model, which combines bidirectional encoding with autoregressive generation. This enables the production of coherent summaries with model-generated phrasing, paraphrasing capabilities, and the integration of information from different parts of the document.

Software implementing the proposed method was developed in accordance with the SOLID principles, ensuring modularity and extensibility of the system.

A comparative study was conducted against four categories of baseline approaches as well as the specialized LongT5 model with an extended context window. Evaluation on a dataset of scientific articles from arXiv demonstrated that the proposed method outperforms traditional approaches and achieves performance comparable to LongT5, while relying on the standard BART-large-CNN model. The method was applied without additional pre-training, which significantly reduces computational requirements.

Key words: text summarization, natural language processing, transformer models, machine learning, information systems.

Постановка проблеми

Резюмування текстів є однією з ключових задач обробки природної мови, яке має широке застосування в багатьох сферах життя, таких як юриспруденція, наукова діяльність, тощо. Резюмування буває двох видів – екстрактивне і абстрактивне. Суть екстрактивного резюмування полягає в виборі найголовніших речень в тексті, без перефразування, в той час як абстрактивне резюмування створює короткий виклад, перефразовуючи і узагальнюючи зміст своїми словами. Через значні виклики при перефразуванні, домінуючим методом резюмування до винайдення моделей-трансформерів був екстрактивний [1]. Сучасні моделі-трансформери, такі як BART, PEGASUS, T5 демонструють дуже гарні результати для коротких і середніх за обсягом текстів, проте мають обмеження розміру контекстного вікна (зазвичай 512–1024 токенів), що значно ускладнює роботу з документами, довшими ніж контекстне вікно [2]. Усічення документів призводить до неповної обробки та, відповідно, неточного резюмування. Екстрактивне ж резюмування, як от з використанням графових методів, не завжди може забезпечити необхідну якість узагальнення. Це зумовило появу значної кількості досліджень, у яких пропонуються нові підходи для резюмування довгих текстів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Абстрактивне узагальнення часто реалізують за допомогою таких передтренированих моделей як BART, PEGASUS, T5. Модель BART має гарні результати завдяки архітектурі енкодер-декодер і попередньому навчанні [3]. Модель PEGASUS оптимізована спеціально для задач резюмування завдяки використанню *gap-sentence generation* під час попереднього навчання [4]. Модель T5 (Text-to-text Transformer) розглядає резюмування як задачу перетворення тексту, досягаючи універсальності за рахунок єдиної архітектури.

Для обробки довгих документів було запропоновано декілька підходів. Модель Hierarchical Transformers [5] використовують багаторівневу архітектуру для обробки локальних та глобальних залежностей. Модель Longformer [6] застосовує механізм розрідженої уваги для масштабування до довших послідовностей. Модель

LED (Longformer Encoder-Decoder) поєднує переваги обох підходів для задач резюмування. Однак ці моделі вимагають значних обчислювальних ресурсів та великих обсягів даних для навчання.

Гібридні підходи намагаються поєднати переваги екстрактивних та абстрактивних методів. Автори Zhang et al. [7] запропонували двоетапний підхід, де спочатку екстрактивна модель виділяє важливі фрагменти, а потім абстрактивна модель генерує фінальне узагальнення.

Нарешті, Sentence-BERT [8] запропонував ефективний спосіб отримання семантичних векторних представлень для речень, що широко використовується у задачах пошуку схожості та кластеризації. Застосування цього підходу для екстрактивного резюмування показало перспективні результати, але неясним залишається можливість його найкращого поєднання з абстрактивними моделями для обробки довгих документів.

Таким чином, незважаючи на значний прогрес у розробці спеціалізованих архітектур для обробки довгих документів, питання ефективного поєднання екстрактивних та абстрактивних методів на основі стандартних моделей-трансформерів залишається недостатньо дослідженим. Зокрема, потенціал інтеграції семантичних векторних представлень Sentence-BERT з абстрактивними моделями типу BART для створення масштабованих рішень без потреби у значних обчислювальних ресурсах та розширених контекстних вікнах потребує детального вивчення. Це визначає актуальність подальших досліджень гібридного застосування моделей-трансформерів для задачі резюмування документів.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є розробка гібридного методу резюмування для узагальнення документів, які перевищують стандартні обмеження розміру контекстного вікна моделей-трансформерів.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні задачі:

- розробити гібридний метод резюмування довгих документів, що поєднує екстрактивні та абстрактивні підходи в рамках чотирьох-етапної архітектури;
- здійснити програмну реалізацію розробленого методу з дотриманням принципів модульності та розширюваності;
- провести порівняльне дослідження запропонованого методу з існуючими підходами на репрезентативній вибірці наукових документів.

Викладення основного матеріалу дослідження

На основі комбінації Map-Reduce підходу з семантичними векторними представленнями та трансформерними моделями було розроблено гібридний метод резюмування документів, узагальнений алгоритм якого наведено на рисунку 1. Метод поєднує Map-Reduce підхід з семантичним відбором і абстрактивною генерацією для досягнення достатньої якості узагальнень, без потреби використання моделей-трансформерів з розширеним контекстним вікном.

Як видно на рисунку 1, на початку методу відбувається розбиття вхідного документу на фрагменти оптимального розміру, при цьому кожен наступний фрагмент включає останні 100 слів попереднього, що запобігає втраті семантичного зв'язку між реченнями на межі розбиття [9].

На другому етапі методу використовується модель Sentence-BERT для семантичного вибору найбільш важливих речень з кожного фрагменту.

На відміну від статистичних методів (TF-IDF) або позиційних методів (Lead-k), Sentence-BERT є оновленою архітектурою BERT, яка спеціально адаптована для ефективної генерації векторних представлень речень. Оригінальна модель BERT вимагає передачі речень парами через мережу, що призводить до складності $O(n^2)$. Модель Sentence-BERT вирішує цю проблему через використання сіамської архітектури, що дозволяє кодувати кожне речення незалежно за один прохід, знижуючи складність до лінійної $O(n)$. У даній роботі була використана модель all-MiniLM-L6-v2 з шістьма шарами, навчена методом контрастного навчання на понад мільярд пар речень. Алгоритм семантичної екстракції складається з декількох етапів. На першому етапі фрагмент документу розбивається на окремі речення за допомогою бібліотеки NLTK, що коректно обробляє аббревіатури та інші специфічні конструкції наукових текстів. Далі кожне речення кодується моделлю all-MiniLM-L6-v2 у 384-вимірний вектор. Процес кодування включає токенизацію за допомогою WordPiece tokenizer (словник 30 000 слів) та проходження через шість шарів трансформера з механізмом самоуваги, а також усереднення векторних подань для отримання підсумкового вектору речення. Для речення з m токенами, представленими векторами $h_1, h_2, \dots, h_m \in R^{768}$, отримуємо фінальне векторне представлення:

$$e = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m h^i, \quad (1)$$

де $e \in R^{384}$ після проєкції з 768 на 384 виміри.

Потім обчислюється центроїд фрагменту – векторне представлення, яке задає загальну семантику тексту. Для фрагменту з n речень і векторами $e_1, e_2, \dots, e_n \in R^{384}$, центроїд $c \in R^{384}$ визначається як середнє арифметичне за формулою:

$$c = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n e^i. \quad (2)$$

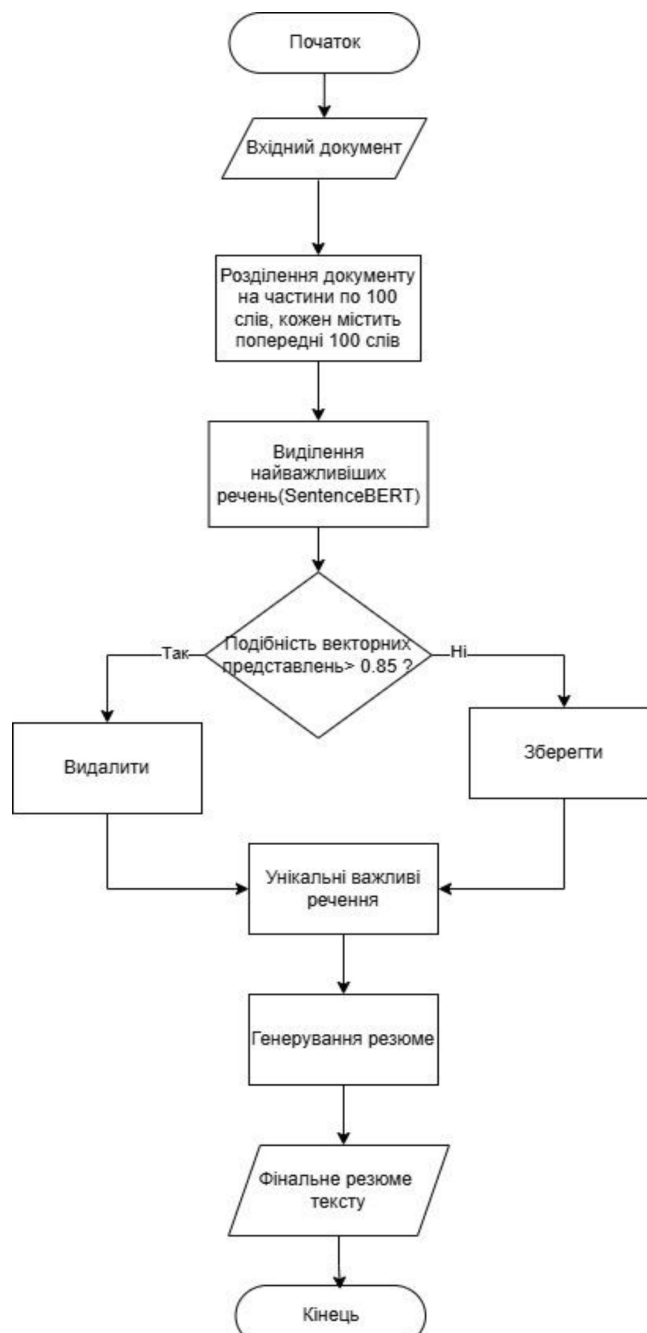


Рис. 1. Узагальнена схема методу гібридного резюмування документа

Геометрично центроїд є центром усіх векторних представлень у просторі, базуючись на припущенні, що найбільш репрезентативні речення про текст близькі до усередненого вектора усіх речень. Для кожного речення обчислюється косинусна подібність до центроїду за формулою:

$$\text{similarity}(e_i, c) = \frac{e_i \cdot c}{(\|e_i\| \cdot \|c\|)}, \quad (3)$$

де $e_i \cdot c$ – скалярний добуток, а $\|e_i\|$, $\|c\|$ – Евклідова норма.

Косинусна подібність нормалізована на інтервалі $[-1, 1]$ і незалежна від довжини векторів, що означає що вона є оптимальною для високимірних просторів. Відбираються декілька речень з найвищою подібністю, зберігаючи оригінальний порядок речень.

Третій етап методу видаляє семантичні дублікати на основі косинусної подібності векторних представлень. Оскільки перший етап створює фрагменти тексту, які містять частини інших для збереження цілісності тексту, а фаза виділення найважливіших частин обробляє кожен фрагмент незалежно, деякі речення можуть бути обрані

декілька разів. Крім того, різні речення можуть висловлювати ідентичні ідеї в різних формулюваннях, що негативно впливає на якість фінального резюме. Для визначення семантичної схожості речень з векторами $e_1, e_2, \dots, e_n \in R^{384}$ застосовується косинусна подібність векторних представлень:

$$\text{similarity}(e_i, e_j) = \frac{e_i \cdot e_j}{(\|e_i\| \cdot \|e_j\|)},$$

де $e_i \cdot e_j$ – скалярний добуток, а $\|e_i\|$ – Евклідова норма.

Косинусна подібність нормалізована в інтервалі $[-1, 1]$, де значення, наближені до 1, свідчать про високий рівень семантичної схожості між текстовими одиницями. Речення вважаються дублікатами за умови, що значення косинусної подібності перевищує поріг 0,85. Вибір даного порогового значення обумовлено результатами емпіричних спостережень: нижчі пороги призводять до надмірного видалення інформації, тоді як вищі не забезпечують фільтрацію дублікатів із незначними варіаціями формулювань.

Далі для набору з n речень $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ з векторами $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ ініціалізується порожня множина унікальних речень U . Для кожного речення s_i обчислюється попарна косинусна подібність з усіма реченнями U . Якщо максимальна подібність не перевищує задане значення, речення додається до множини U , інакше відкидається. Таким чином, алгоритм має складність $O(n \cdot m)$, де m – розмір фінальної множини U .

Наприкінці методу генерується фінальне резюме з використанням моделі BART-large-CNN (Bidirectional and Auto-Regressive Transformers), яка є архітектурою типу sequence-to-sequence на основі трансформерів, що поєднує двонаправлене кодування вхідного тексту і авторегресивну генерацію вихідного тексту. Довжина резюме регулюється параметрами, і зазвичай складає 80–120 слів. На основі розробленого методу було створене відповідне програмне забезпечення.

Програмний продукт для застосування методу розроблено в середовищі PyCharm на мові Python версії 3.11. Програма складається з файлу розробленої моделі та файлів інших методів, які використовувались для порівняння. На рисунку 2 зображена діаграма класів розробленого методу.

Розроблена програма містить 4 інтерфейси, які визначають абстракції для кожної фази обробки документа. Інтерфейс IDocumentSplitter відповідає за розбиття вхідного тексту, ISentenceExtractor забезпечує виділення репрезентативних речень, IRedundancyReducer виконує видалення семантичних дублікатів, а IAbstractiveSummarizer

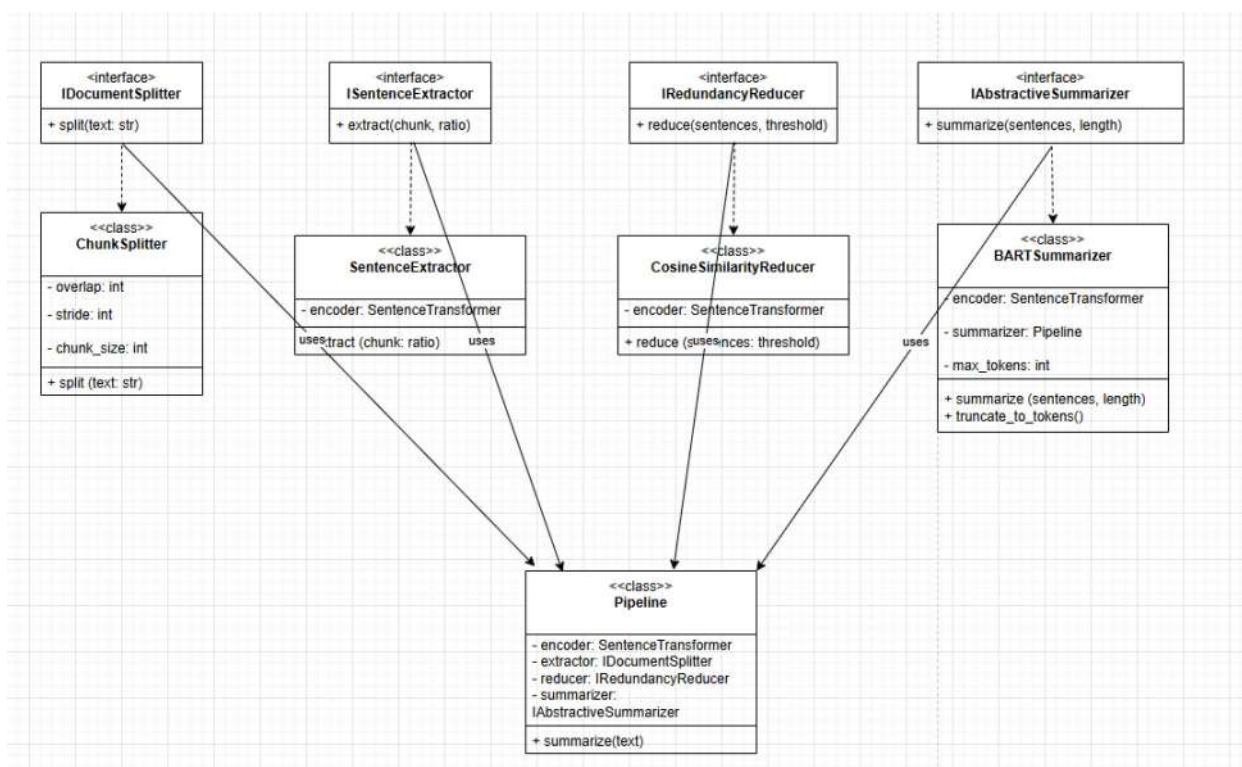


Рис. 2. Діаграма класів розробленого методу

генерує фінальне резюме. Кожен інтерфейс визначає один ключовий метод. Кожний інтерфейс має клас, який його реалізує. Клас ChunkSplitter розбиває документ з параметрами overlap і chunk_size. Наступний клас, SentenceExtractor використовує модель SentenceTransformer для створення векторних представлень і відбору

речень на основі центроїду. Клас CosineSimilarityReducer застосовує косинусну подібність для видалення дублікатів, також використовуючи SentenceTransformer. Головний клас BARTSummarizer використовує модель BART для генерації фінального резюме через Pipeline клас.

Клас Pipeline виступає координатором всієї системи, яка агрегує всі компоненти через їх інтерфейси. Використовуючи розроблене програмне забезпечення, було виконано порівняльне дослідження методу на тестових даних.

Тестування проводилось на наборі наукових статей з arXiv. Були відібрані 5 документів різної довжини (від 3000 до 6000 слів) з галузей фізики і математики. Кожен документ містив короткий опис на початку документу який був використаний в якості порівняння для оцінки якості згенерованого резюме.

Оцінка якості проводилась з використанням двох груп метрик. Перша група – метрики ROUGE (ROUGE-1, ROUGE-2, ROUGE-L), які вимірюють лексичне перекриття і найдовшої спільної послідовності. Друга група метрик – BERTscore, які вимірюють семантичну подібність між згенерованим і еталонним резюме на основі концептуальних векторних представлень.

В таблиці 1 наведені результати порівнянь за метриками ROUGE. Були розглянуті як традиційні методи (TF-IDF), так і більш новітні, на основі машинного навчання. Метод на основі позиції речення демонструє високі результати завдяки специфічній структурі наукових статей, де найважливіша інформація традиційно концентрується на початку документа. Однак цей підхід має обмежену універсальність і не забезпечує ефективної роботи з документами альтернативної структури.

Таблиця 1

Порівняння ROUGE-1 метрики для різних методів

Метод	Складність	ROUGE-1
Lead-k(позиція речення)	$O(1)$	0.33
TF-IDF + косинусна подібність	$O(n^2)$	0.27
Sentence-BERT + центроїд(розроблений)	$O(n)$	0.35
BERT cls token	$O(n^2)$	0.38

Метод TF-IDF показав найнижчі результати серед досліджуваних підходів. Це пояснюється тим, що він враховує лише частотність слів, ігноруючи їх семантичну значущість, що призводить до неефективної обробки текстів з великою кількістю спеціалізованої термінології.

Метод на основі BERTcls tokenів продемонстрував найкращі показники якості, проте поступається використаному в дослідженні методу Sentence-BERT з вибором за центроїдом за швидкістю обробки. Ця різниця стає критичною при роботі з довгими документами, де час обробки є важливим фактором.

Застосування семантичних векторних представлень Sentence-BERT забезпечує оптимальний баланс між якістю відбору найважливіших речень та ефективністю обробки документів. На відміну від методів, що базуються на позиції речення чи частотності слів, цей підхід здатний вилучати інформативні речення з будь-якої частини документа, включаючи середину та кінець, а не лише з початку, як це характерно для традиційних методів. Така властивість робить його більш універсальним для різних типів документів та структур викладу інформації.

На рисунку 3 зображені результати порівняння за ROUGE-метриками. Були розглянуті наступні методи:

- розроблений метод: Map-Reduce з вектором семантичних представлень;
- LongT5: спеціалізована модель-трансформер, здатна оброблювати довгі документи(до 16000 tokenів);
- Map-Reduce+BART: базовий Map-Reduce без семантичної екстракції;
- TextRank+BART: виділення найважливіших речень на основі графового алгоритму і генерація резюме через BART;

- T5-base: стандартна модель трансформер, яка приймає до 1024 токени.

Як видно з діаграми на рисунку 3, за метрикою ROUGE-1 F1 наявна перевага запропонованого методу – він показав найвищий результат (0.5852 ± 0.027). Це на 4.4 % краще ніж спеціалізована модель-трансформер LongT5(0.5603 ± 0.017) і на 16.1 % краще за базовий Map-Reduce+BART.

За метрикою ROUGE-2, що вимірює збіг біграм, запропонований метод показав кращі результати також: 0.1420 ± 0.032 проти 0.0980 ± 0.028 у LongT5 (+44.9 %). Це вказує на те, що згенеровані резюме не тільки містять правильні слова, але й зберігають типові словосполучення з оригінальних окументів. За метрикою ROUGE-L F1 (найдовша спільна підпослідовність) результат запропонованого методу становить 0.2385 ± 0.045 проти 0.1840 ± 0.038 у LongT5, що свідчить про краще збереження структури та порядку інформації з оригінального тексту.

Результати порівняння за метрикою BERTscore представлені на рисунку 4.

Як видно з діаграми, запропонований метод показав найкращий результат з усіх методів – 0.5852. Це на 4.4 % краще за спеціалізовану модель-трансформер LongT5 і на 16 % краще за схожий Map-Reduce метод.

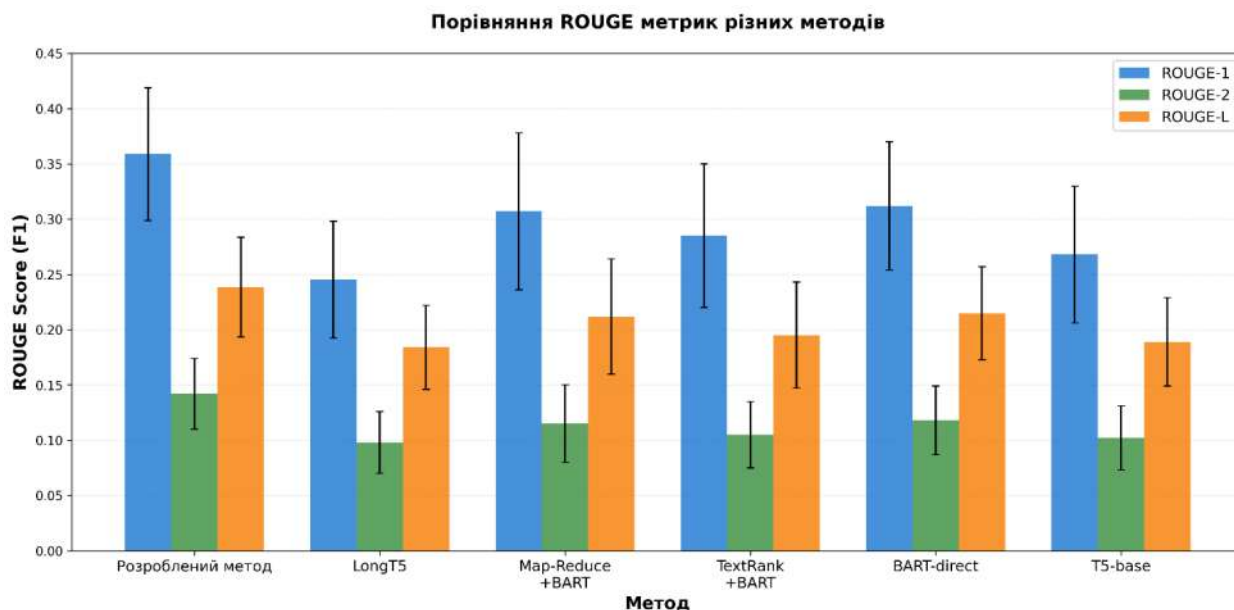


Рис. 3. Порівняння результатів ROUGE-метрик для різних методів

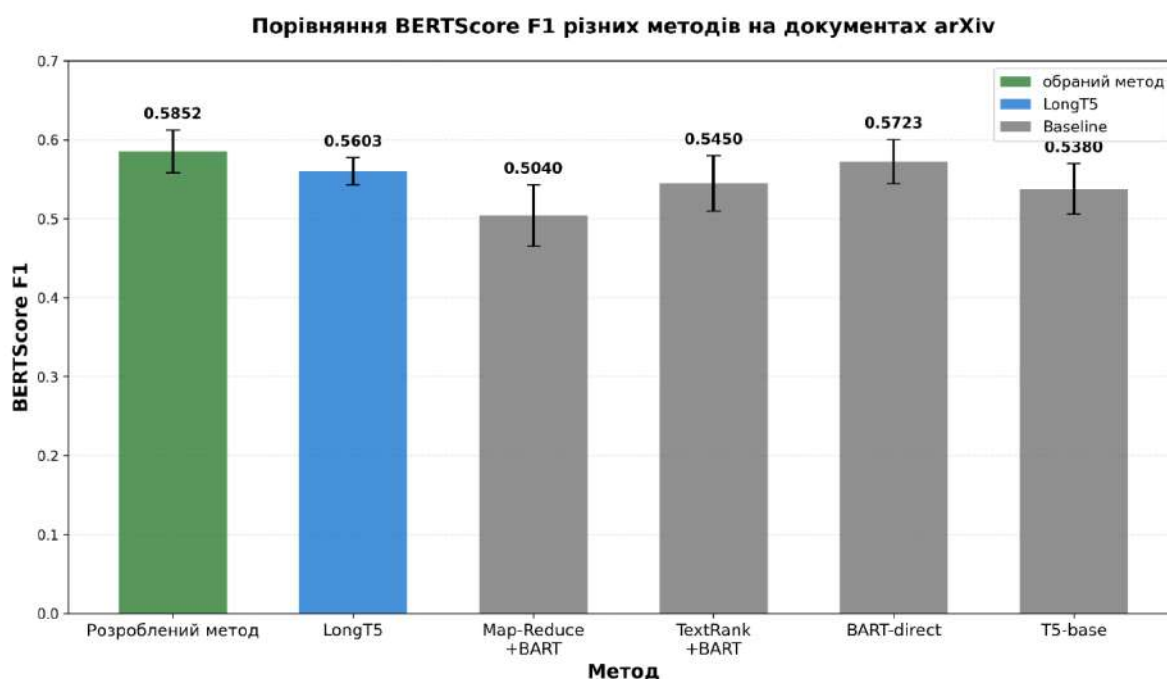


Рис. 4. Порівняння результатів BERTscore-метрик для різних методів

Висновки

Розроблено гібридний метод резюмування довгих наукових документів, що поєднує розбиття документу на перекриваючі фрагменти, семантичну екстракцію з використанням Sentence-BERT, видалення семантичних дублікатів через косинусну подібність векторних представлень та абстрактивну генерацію за допомогою BART-large-CNN. Метод дозволяє обробляти документи довільної довжини без використання спеціалізованих моделей з розширеним контекстним вікном.

Здійснено програмну реалізацію методу з дотриманням SOLID принципів, що забезпечує модульність та можливість заміни окремих компонентів системи. З використанням розробленого програмного забезпечення проведено порівняльне дослідження методу на вибірці наукових статей arXiv. За метрикою ROUGE-1 F1 запропонований метод показав результат 0.5852 ± 0.027 , що на 4.4 % краще за спеціалізовану модель LongT5 та на 16.1 % краще за базовий Map-Reduce + BART. Результати підтверджують ефективність гібридного підходу для резюмування документів з використанням стандартних моделей-трансформерів без додаткового дотренування.

Отримані результати підтверджують доцільність подальших досліджень з поєднання семантичної екстракції на основі векторних представлень з абстрактивною генерацією для задачі резюмування наукових документів.

Список використаної літератури

1. See A., Liu P. J., Manning C. D. Get To The Point: Summarization with Pointer-Generator Networks. Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2017. Vol. 1. P. 1073–1083. <https://doi.org/10.18653/v1/P17-1099>
2. Huang L., Wu L., Wang L. An Empirical Survey on Long Document Summarization: Datasets, Models, and Metrics. ACM Computing Surveys. 2022. Vol. 55, № 8. Article 157. <https://doi.org/10.1145/3545176>
3. Lewis M., Liu Y., Goyal N., Ghazvininejad M., Mohamed A., Levy O., Stoyanov V., Zettlemoyer L. BART: Denoising Sequence-to-Sequence Pre-training for Natural Language Generation, Translation, and Comprehension. Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2020. P. 7871–7880. <https://doi.org/10.18653/v1/2020.acl-main.703>
4. Zhang J., Zhao Y., Saleh M., Liu P. J. PEGASUS: Pre-training with Extracted Gap-sentences for Abstractive Summarization. Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning. 2020. P. 11328–11339. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.08777>
5. Liu Y., Lapata M. Hierarchical Transformers for Multi-Document Summarization. Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2019. P. 5070–5081. <https://doi.org/10.18653/v1/P19-1500>
6. Beltagy I., Peters M. E., Cohan A. Longformer: The Long-Document Transformer. arXiv preprint arXiv:2004.05150. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.05150>
7. Zhang X., Wei F., Zhou M. HIBERT: Document Level Pre-training of Hierarchical Bidirectional Transformers for Document Summarization. Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2019. P. 5059–5069. <https://doi.org/10.18653/v1/P19-1499>
8. Reimers N., Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks. Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. 2019. P. 3982–3992. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.10084>
9. Automatic text summarization of scientific articles using transformers: A brief review. Journal of Artificial Intelligence. 2024. Vol. 7, № 5. <https://doi.org/10.32629/jai.v7i5.1331>

References

1. See, A., Liu, P. J., & Manning, C. D. (2017). Get to the point: Summarization with pointer-generator networks. In Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Vol. 1, pp. 1073–1083). Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/P17-1099>
2. Huang, L., Wu, L., & Wang, L. (2022). An empirical survey on long document summarization: Datasets, models, and metrics. ACM Computing Surveys, 55(8), Article 157. <https://doi.org/10.1145/3545176>
3. Lewis, M., Liu, Y., Goyal, N., Ghazvininejad, M., Mohamed, A., Levy, O., Stoyanov, V., & Zettlemoyer, L. (2020). BART: Denoising sequence-to-sequence pre-training for natural language generation, translation, and comprehension. In Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (pp. 7871–7880). Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/2020.acl-main.703>
4. Zhang, J., Zhao, Y., Saleh, M., & Liu, P. J. (2020). PEGASUS: Pre-training with extracted gap-sentences for abstractive summarization. In Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning (pp. 11328–11339). PMLR. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.08777>
5. Liu, Y., & Lapata, M. (2019). Hierarchical transformers for multi-document summarization. In Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (pp. 5070–5081). Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/P19-1500>
6. Beltagy, I., Peters, M. E., & Cohan, A. (2020). Longformer: The long-document transformer. arXiv preprint arXiv:2004.05150. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.05150>
7. Zhang, X., Wei, F., & Zhou, M. (2019). HIBERT: Document level pre-training of hierarchical bidirectional transformers for document summarization. In Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (pp. 5059–5069). Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/P19-1499>
8. Reimers, N., & Gurevych, I. (2019). Sentence-BERT: Sentence embeddings using Siamese BERT-Networks. In Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (pp. 3982–3992). Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.10084>
9. Automatic text summarization of scientific articles using transformers: A brief review. (2024). Journal of Artificial Intelligence, 7(5). <https://doi.org/10.32629/jai.v7i5.1331>

Дата першого надходження статті до видання: 14.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

УДК 005.334

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.1.56>

А. І. ПЛЯСКІНА

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри менеджменту, маркетингу і туризму
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-3680-162X

А. В. БЕРИСЛАВСЬКА

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри менеджменту, маркетингу і туризму
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-0112-4059

РЕФЛЕКСІЯ УПРАВЛІННЯ ЕКСПОРТНИМИ ПІДПРИЄМСТВАМИ
В СИТУАЦІЯХ З ВИСОКИМ РІВНЕМ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Встановлено, що підприємства не мають можливості безпосередньо контролювати фактори зовнішнього середовища, але вони систематично аналізуються задля можливості сформувати ресурсну базу. Це необхідно для зменшення потенційних ризиків, створення своєї стратегічної позиції. Для дослідження віддаленого оточення частіше використовують стратегічний інструмент – PEST-аналіз, який допомагає оцінити вплив зовнішнього середовища (макросередовища) на експортне підприємство. Підсумовуючи PEST-аналіз експортних підприємств за 2022–2025 роки можна виділити головні фактори впливу на діяльність: політичні фактори (воєнний стан, руйнування інфраструктури, окуповані території, блокада Чорного моря (зміна маршрутів постачання), ситуація на польсько-українському кордоні, переміщення складів та виробництва); економічні фактори (скорочення споживчого попиту, зростання цін, дестабілізація фінансової системи); соціальні фактори (міграція населення (ВПО, біженці), демографічний склад, зміна структури населення (збільшення смертності в порівнянні з народжуваністю), зниження рівня життя, зміна поведінки споживачів, зростання соціальної напруги); технологічні фактори (збоїв в роботі мережі Інтернет, зростання кібератак, зміна технологій і зростання онлайн-торгівлі).

З'ясовано, що для визначення стратегічного потенціалу підприємства, обрання оптимальної стратегії розвитку, рівня її адаптаційних можливостей проводиться SWOT-аналіз. Розкрито, що для подальшого зміцнення позицій на ринку необхідно диверсифікувати канали поставок, розширювати виробничі потужності, інвестувати в цифровізацію управління ланцюгами постачання, підвищувати міжнародну впізнаваність, мінімізувати валютні та логістичні ризики.

Зазначені теоретико-методичні напрацювання дослідження є підґрунтям для подальших наукових розвідок у сфері зовнішньоекономічної діяльності, стратегії розвитку в ситуаціях з високим рівнем невизначеності.

Ключові слова: управління, експортні підприємства, фактори зовнішнього оточення, аналіз, інструменти стратегічного управління, невизначеність, ризик.

А. І. PLYASKINA

PhD in Economics, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Management, Marketing and Tourism
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-3680-162X

А. В. BERISLAVSKA

PhD in Economics, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Management, Marketing and Tourism
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-3680-162X



© А. І. Пляскіна, А. В. Бериславська, 2026

Стаття поширюється на умовах відкритої ліцензії CC BY 4.0

REFLECTION ON THE MANAGEMENT OF EXPORT ENTERPRISES IN SITUATIONS WITH A HIGH LEVEL OF UNCERTAINTY

It has been established that enterprises cannot completely control the factors of the external environment, but they are systematically analyzed in order to formulate a resource base. This is necessary to change potential risks by building your strategic position. To monitor the long-term accuracy, a strategic tool is often used – PEST analysis, which helps to assess the influx of the current medium (macro-medium) into export business. Based on the PEST analysis of export enterprises for 2022–2025, one can see the main factors influencing activity: political factors (military state, infrastructure collapse, occupied territories, blockade of the Black Sea (change of delivery routes), situation at the Polish-Ukrainian border, relocation of warehouses and production); economic factors (shorter life expectancy, rising prices, destabilization of the financial system); social factors (migration of the population (HPO, refugees), demographic structure, change in population structure (increased mortality rate in line with the population), decreased level of living, change in behavior living conditions, increasing social tension); technological factors (failures in Internet traffic, an increase in cyber attacks, changes in technology and the growth of online trading).

It is clear that in order to identify the strategic potential of an enterprise, in order to determine the optimal development strategy, and the level of adaptation capabilities, a SWOT analysis is carried out. It is clear that in order to further improve our market position it is necessary to diversify supply channels, expand production activities, invest in digitalization of supply chain management, and promote international recognition, minimizing foreign exchange and logistics risks.

Theoretical and methodological research is assigned to further scientific exploration in the field of foreign economic activity, development strategies in situations with high levels insignificance.

Key words: management, export enterprises, factors of external excellence, analysis, strategic management tools, non-importance, risk.

Постановка проблеми

Зовнішньоекономічна діяльність є пріоритетним напрямком роботи, стратегічною ціллю розвитку підприємства, адже експорт формує основний фінансовий потік та забезпечує стабільність у кризовій умові, в якій зараз знаходиться український бізнес. І саме критичний аналіз прийнятих рішень та адаптація стратегій у відповідь на нестабільність зовнішнього середовища спонукає до постійного перегляду методів, інструментів, рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Що буде далі? Покаже час і наша з вами витривалість.

А зараз аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про стійкий інтерес до проблем зовнішньоекономічної діяльності підприємств. Зосереджується увага на аналізі експортного потенціалу, інструментах підтримки вітчизняного бізнесу, структурних трансформаціях зовнішньої торгівлі. Проте частина цих досліджень ґрунтується на узагальнених макроекономічних оцінках, не враховуючи сучасні виклики, пов'язані з повномасштабною війною, змінами глобального попиту, захисту.

Формулювання мети дослідження

Зовнішні ринки стають турбулентними (через війну, зміну логістики, санкції), і здатність управлінців швидко «перезібрати» свій досвід визначає успіх підприємств. Ці зовнішні фактори впливу формують значний економічний тиск, однак водночас стимулюють підприємства до оптимізації, модернізації процесів. Вплив зовнішніх факторів є критичним, але підприємство має можливості для адаптації та стратегічного розвитку завдяки інноваційним технологіям, розширенню ринків та вдосконаленню операційних процесів. Тому саме рефлексія управління експортними підприємствами в ситуаціях з високим рівнем невизначеності є не просто аналіз помилок, а критично важливий інструмент виживання.

Викладення основного матеріалу дослідження

Експортні підприємства перебувають під постійним впливом факторів зовнішнього середовища. Це можуть бути як поведінка конкурентів, так і регуляторна політика держав, глобальні ринкові зміни. Оскільки підприємства не мають можливості безпосередньо контролювати фактори зовнішнього середовища, але вони систематично аналізуються задля можливості сформувати ресурсну базу для зменшення потенційних ризиків, створення своєї стратегічної позиції. Водночас зовнішнє середовище може формувати й нові можливості та загрози для розвитку, які підприємству доцільно виявляти та ефективно використовувати.

Для дослідження віддаленого оточення частіше викоритосують стратегічний інструмент (PEST-аналіз). Такий інструмент допомагає оцінити вплив зовнішнього середовища (макросередовища) на експортне підприємство, скласти довгостроковий прогноз розвитку, комплексно проаналізувати вплив соціальних, технологічних, економічних та політичних факторів на діяльність підприємств. Цей інструмент дає змогу визначити чинники із позитивним впливом (позначені «+») та чинники, які формують ризики для підприємства (позначені «-»), а також сформувати загальне бачення стану ринку на майбутні кілька років [11].

У 2022–2025 роках довгострокове прогнозування українських підприємств ускладнюється високим рівнем невизначеності, пов'язаною з воєнним станом та зміною структур ринку. Тому результати PEST-аналізу

в сьогоденішніх умовах розглядається з урахуванням можливих відхилень та необхідністю постійного гнучкого коригування планів. Так,

1. Політичні фактори (Political)

Вторгнення росії в Україну суттєво вплинуло на виробничо-логістичні процеси експортних підприємств. Через руйнування інфраструктури, обмеження транспортних коридорів та блокування морських шляхів українські компанії були змушені скорегувати логістичні маршрути, адаптуватися до нових умов.

Основні політичні ризики включають:

- зміна зовнішньоторговельної політики та неминуча переорієнтація на нові ринки збуту й канали постачання;
- блокування або ускладнення руху товарів через західний кордон, зокрема на польсько-українських пунктах пропуску;
- порушення транспортної інфраструктури, що ускладнює доставку комплектуючих та готової продукції;
- вимушене перенесення складських та виробничих потужностей у більш безпечні регіони, зокрема західний регіон України.

Водночас Уряд України вживає заходів підтримки бізнесу, зокрема у сфері логістики, спрощуючи регуляції та стимулюючи відновлення інфраструктури, що створює певні можливості для підприємств галузі [4; 7].

2. Економічні фактори (Economic)

Воєнні дії істотно вплинули на економічний стан українського ринку.

Основні економічні виклики:

- дефіцит кадрів через мобілізацію частини працівників;
- скорочення попиту в окремих сегментах промисловості через зниження інвестиційної активності та скорочення роботи підприємств;
- здорожчання матеріалів, енергоносіїв та логістичних послуг, що безпосередньо підвищує собівартість продукції (наданих послуг);
- валютна нестабільність, яка ускладнює закупівлю імпортованих комплектуючих та структуру цінової політики;
- труднощі з фінансуванням у модернізацію виробництва.

3. Соціальні фактори (Social)

Соціальні зміни в Україні також напряму впливають на діяльність експортних підприємств. До ключових соціальних чинників належать: масштабна внутрішня міграція (станом на 2025 рік, понад 73,5 млн українських людей є внутрішньо переміщеними особами), яка змінює розподіл трудових ресурсів і впливає на доступність кваліфікованих кадрів; зниження платоспроможності населення та зміна пріоритетів споживачів, яка впливає на попит з боку підприємств кінцевих галузей; підвищення соціальної напруги та загальної невизначеності, що потребує гнучких моделей управління персоналом; зростання значення гуманітарної та соціальної відповідальності бізнесу (зокрема участі у відновленні інфраструктури чи постачанні критично важливого обладнання).

У таких реаліях важливою конкурентною перевагою стає здатність експортного підприємства підтримувати стабільну комунікацію з клієнтами, забезпечувати якісний сервіс та формувати довгострокові партнерські відносини.

4. Технологічні фактори (Technological)

Технічний розвиток та цифровізація суттєво впливають на підприємства. Важливими є такі аспекти:

- поява інноваційних технологій, які формують потребу в модернізації виробничих процесів та підвищенні кваліфікації персоналу;
- можливі збої в роботі інтернет-мереж і електропостачання, що вимагає наявності резервних систем зв'язку та хмарних сервісів;
- активний розвиток технологій дистанційного обслуговування обладнання, що створює нові можливості для розширення сервісних послуг;
- зростання кіберзагроз, що потребує підвищених заходів інформаційної безпеки;
- поширення цифрових платформ, онлайн-торгівлі та інтеграційних рішень, що може забезпечити вихід підприємства на нові глобальні сегменти ринку.

Підсумовуючи PEST-аналіз експортних підприємств за 2022-2025 роки можна виділити головні фактори впливу на діяльність:

1. Політичні фактори (Political): воєнний стан, руйнування інфраструктури, окуповані території, блокада Чорного моря, зміна маршрутів постачання, ситуація на польсько-українському кордоні, переміщення складів та виробництва.

2. Економічні фактори (Economic): скорочення споживчого попиту, зростання цін, дестабілізація фінансової системи.

3. Соціальні фактори (Social): міграція населення (ВПО, біженці), демографічний склад, зміна структури населення (збільшення смертності в порівнянні з народжуваністю), зниження рівня життя, зміна поведінки споживачів, зростання соціальної напруги.

4. Технологічні фактори (Technological): збої в роботі мережі Інтернет, зростання кібератак, зміна технологій і зростання онлайн-торгівлі.

Таким чином, застосування PEST-аналізу на практиці дозволяє експортним підприємствам комплексно оцінити зовнішнє середовище та сформувані стратегічні орієнтири, спрямовані на використання наявних можливостей і мінімізацію впливу загроз. На його основі підприємство може розробити адаптивну стратегію на найближчі кілька років.

Для узагальнення результатів PEST-аналізу закріплюється всі позитивні та негативні фактори, після чого розраховується інтегральна значущість зовнішнього середовища. Це дозволить визначити рівень турбулентності, у якому сьогодні працюють експортні підприємства.

Отримані результати дослідження свідчать, що підприємство працює в умовах суттєвих викликів, спричинених війною, економічною нестабільністю, зміною споживчого попиту та високим рівнем конкуренції. Проте водночас зовнішнє середовище формує й низку перспективних можливостей, зокрема активний розвиток промислових технологій, цифровізацію бізнес-процесів, оновлення інфраструктури країни.

Результати проведеного PEST-аналізу показують, що макросередовище, у якому працює експортне підприємство, є доволі нестабільним і містить низку ризиків. Однак разом із загрозами існують і значні можливості, пов'язані з технологічним оновленням підприємств, зростанням потреби у модернізації виробництва, а також активним розвитком промислових рішень для відбудови України.

Для обрання оптимальної стратегії розвитку, визначення стратегічного потенціалу підприємства та рівня його адаптаційних можливостей проводиться SWOT-аналіз. Цей аналіз експортні підприємства розглядають як цілісну економічну систему, що функціонує у динамічних ринкових умовах. Він дозволяє структурувати великий обсяг інформації, який необхідно враховувати під час прийняття управлінських рішень.

Основною метою SWOT-аналізу є визначення реальних можливостей і загроз розвитку підприємства, а також формування стратегічних пріоритетів відповідно до умов ринку. Перед його проведенням визначаються такі завдання: ідентифікація можливостей, що відповідають наявним ресурсам та компетенціям підприємства; визначення основних загроз та розробка заходів щодо мінімізації їх впливу; аналіз сильних сторін підприємства та їх співвіднесення з ринковими перспективами; виявлення слабких місць і сформування рішень для їх усунення; визначення конкурентних переваг та окреслення стратегічних напрямів розвитку. Проаналізуємо детальніше основні загрози та можливості.

1. S – Strengths (Сильні сторони)

1.1. Підприємство здійснює повний цикл робіт: виробництво та підготовка (формування партії товару, маркування, пакування відповідно до вимог країни-імпортера) → документальне оформлення (отримання сертифікатів походження, якості, фітосанітарних, ветеринарних сертифікатів) → митний режим (з 2024 року діють жорсткіші вимоги до валютної виручки (повернення не менше 80 відсотків за дванадцять місяців) → логістика (організація транспортування, страхування вантажу та перетин кордону) → податковий облік (застосування нуль відсотків податку на додану вартість за умови підтвердження вивезення, визнання доходу за курсом Національного банку України на дату першої події). Це створює високу додану вартість і забезпечує контроль на всіх етапах.

1.2. Співпраця з українськими експортними підприємствами передбачає доступ до міжнародних ринків, передусім Європейського Союзу (майже 40 відсотків). Основні сектори: агропромисловий комплекс (олія, зернові, м'ясо), металургія, IT та транспортні послуги. Партнерство здійснюється через Каталог експортерів Дія.Бізнес та міжнародні тендери.

1.3. Українські підприємства володіють значним міжнародним потенціалом завдяки експорту агропродукції (понад 40 відсотків загального обсягу), запасам критичної сировини (літій, кобальт) та розвитку IT-сектору. Понад 85 відсотків європейських компаній оптимістично оцінюють інвестиційні перспективи України, активно співпрацюючи у сферах партнерства та спільних підприємств. Основними торговельними партнерами є Польща, Німеччина та Італія.

1.4. Гнучкість у стратегічній, операційній (разом із підприємницькою орієнтацією), технологічній, виробничій, фінансовій, менеджерській, адміністративній процесах і операціях, постійно їх трансформуючи. Підприємства створюють індивідуальні рішення «під ключ».

1.5. Позитивна репутація на ринку. У портфоліо компанії – успішні операції для промислових підприємств різних галузей.

1.6. Експортні підприємства здатні адаптуватися до міжнародних стандартів, диверсифікації ринків збуту та вищій рентабельності, мають кращий кадровий потенціал, знання міжнародного права та доступ до валютної виручки, що забезпечує стійкість.

2. W – Weaknesses (Слабкі сторони)

2.1. Залежність від коливань валютних курсів, коливання геополітики та транспортних маршрутів можуть призводити до затримок і подорожчання.

2.2. Обмеженість виробничих потужностей. Відсутність великих промислових площ чи масштабного обладнання ускладнює реалізацію надвеликих проєктів, операцій.

2.3. Недостатня цифровізація, що може створювати труднощі у побудові ефективних ланцюгів постачання.

2.4. Низька впізнаваність бренду на міжнародному ринку. Хоча підприємство має партнерів за кордоном, глобальна присутність обмежена.

2.5. Висока собівартість виробництва, обмежені фінансові ресурси для виходу на нові ринки. Висока залежність від кон'юнктури зовнішніх ринків, експортні квоти, політичні ризики та висока конкуренція. Високі витрати на транспортування та складні процедури митного оформлення.

3. О – Opportunities (Можливості)

3.1. Участь у міжнародних проєктах та тендерах. Співпраця з Європейським Союзом та програмами модернізації підприємств дозволяє залучати іноземне фінансування.

3.2. Поглиблення співпраці з постійними партнерами. Збільшення асортименту поставок, розширення сервісних програм і дистанційних рішень.

3.3. Можливість масштабування виробництва. Залучення інвестицій або грантів дозволить підприємству вийти на нові сегменти ринку.

3.4. Цифровізація. Автоматизація ланцюгів постачання зменшує витрати, підвищує точність планування та скорочує час поставок.

3.5. Експорт зменшує залежність від внутрішнього ринку, дозволяючи стабілізувати доходи.

4. Т – Threats (Загрози)

4.1. Валютні та логістичні ризики. Нестабільність міжнародних поставок, зростання вартості доставки, митні коливання.

4.2. Посилення конкуренції. На міжнародному ринку здебільше працюють крупні гравці з великими виробничими та фінансовими ресурсами.

4.3. Геополітичні ризики та нестабільність економіки. Впливають на імпорт, експорт, можливість реалізації великих проєктів.

4.4. Технологічні зміни та високі вимоги до інноваційності. Постійне оновлення технологій вимагає інвестицій у модернізацію обладнання та навчання персоналу.

4.5. Ризики порушень у ланцюгах постачання. Будь-які перебої у роботі іноземних постачальників можуть затримати виконання замовлень.

Більшість експортних підприємств має значний потенціал для розвитку завдяки комплексності послуг, співпраці з міжнародними виробниками. Однак для подальшого зміцнення позицій на міжнародному ринку необхідно диверсифікувати канали поставок, розширювати виробничі потужності, інвестувати в цифровізацію управління ланцюгами постачання, підвищувати міжнародну впізнаваність, мінімізувати валютні та логістичні ризики.

Висновки

Отже, управління мережею міжнародних процесів експортних підприємств спрямована на формування ефективного та стійкого зовнішньоекономічного ланцюга постачання, який забезпечує безперервність виробничих процесів і стабільне забезпечення підприємства необхідними компонентами, матеріалами та обладнанням. Експортні підприємства орієнтуються на підвищення якості логістичного сервісу, скорочення часу постачання та оптимізацію витрат, прозорості та керованості транспортно-складських операцій, удосконалення процесів митного оформлення, підвищенні рівня безпеки перевезень і мінімізації ризиків, пов'язаних із міжнародними поставками, зміцнення конкурентних позицій на ринку та оперативного реагування на зміни глобального середовища.

Список використаної літератури

1. Беляєв О. В., Коваленко І. І. Управління ризиками в міжнародних ланцюгах поставок. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство. 2022. Вип. 42. С. 45–50.

2. Закон України «Про транспорт»: від 10.11.1994 № 232/94-ВР. Відомості Верховної Ради України. 1994. № 51. Ст. 446. (Зі змінами).

3. Постанова Кабінету Міністрів України про затвердження Ліцензійних умов провадження господарської діяльності з перевезення пасажирів, небезпечних вантажів та небезпечних відходів річковим, морським, автомобільним, залізничним транспортом: від 02.12.2015 № 1001. Офіційний вісник України. 2015. № 98. Ст. 3362. (Зі змінами).

4. Official website of the LLC URL: <https://lwtengineering.com.ua/>

5. Stattev V., Boiarchuk A., Portna O., Dielini M., Pylypiak O. Formation of a System of Anti-Crisis Entrepreneurship of Services Companies. *Journal of Entrepreneurship Education*. Research Article: 2019 Vol: 22 Issue: 1S (Title Entrepreneurship: Investment and Innovation). URL: <https://www.researchgate.net/profile/Marynaielini/publication/344373961.pdf>

References

1. Byelyayev O. V., Kovalenko I. I. (2022). Upravlinnya ryzykamy v mizhnarodnykh lantsyuhakh postavok. Naukovyy visnyk Uzhhorods'koho natsional'noho universytetu. Seriya: Mizhnarodni ekonomichni vidnosyny ta svitove hospodarstvo. 2022. Vyp. 42 [in Ukrainian].
2. Zakon Ukrainy "Pro transport": vid 10.11.1994 № 232/94-VR. Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrainy. 1994. № 51. St. 446. (Zi zminamy) [in Ukrainian].
3. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy pro zatverdzhennya Litsenziynykh umov provadzhennya hospodars'koyi diyal'nosti z perevezennya pasazhyriv, nebezpechnykh vantazhiv ta nebezpechnykh vidkhodiv richkovym, mors'kym, avtomobil'nym, zaliznychnym transportom: vid 02.12.2015 № 1001. Ofitsiyny visnyk Ukrainy. 2015. № 98. St. 3362. (Zi zminamy) [in Ukrainian].
4. Official website of the LLC URL: <https://lwtengineering.com.ua/> [in English].
5. Stattev V., Boiarchuk A., Portna O., Dielini M., Pylypiak O. (2019). Formation of a System of Anti-Crisis Entrepreneurship of Services Companies. *Journal of Entrepreneurship Education*. Research Article: 2019 Vol: 22 Issue: 1S (Title Entrepreneurship: Investment and Innovation). URL: <https://www.researchgate.net/profile/Marynaielini/publication/344373961.pdf> [in English].

Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

ПУБЛІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

УДК 378.014.5:338.2

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.1.57>

О. В. ГРИГОРАШ

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри фінансів, банківської справи та страхування
Університет митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-8089-3755

**РЕФОРМИ ФІНАНСУВАННЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ У КРАЇНАХ ОЕСР:
АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ПІДХОДІВ**

У статті узагальнено підходи до реформування систем фінансування вищої освіти в країнах ОЕСР в умовах розширення доступу до вищої освіти та посилення фінансових обмежень. Відповідно до поставленої мети в дослідженні проаналізовано сутність ключових реформ з урахуванням змін у взаємодії між державою, освітніми інституціями та здобувачами освіти, а також сформовано класифікацію відповідних механізмів. Аналіз проведено на основі аналітичних матеріалів ОЕСР та Європейської Комісії. Визначено передумови реформ: бюджетний тиск, зростання чисельності студентів, підвищення вимог до прозорості й результативності публічних витрат, посилення ролі досліджень та інновацій, а також потребу у розширенні автономії університетів.

Визначено, що на рівні «держави – здобувачі освіти» реформи реалізовувалися через механізми розподілу вартості освітніх послуг (*cost-sharing*): прямі (запровадження плати за навчання або її підвищення, відкладені платежі) і непрямі (скорочення грантів, заміна грантів кредитами, обмеження бюджетних місць, перекладання супутніх витрат). Реформи були спрямовані на скорочення ролі держави у фінансуванні освітньої діяльності та перенесення повної або часткової відповідальності за оплату освітніх послуг на здобувачів освіти.

На рівні «держави – заклади вищої освіти» встановлено перехід від постатейного бюджетування до управління через фінансування: поширення формульного розподілу коштів, блок-грантів, результативно-орієнтованого фінансування, контрактних угод і конкурсного проєктного фінансування. З одного боку, це сприяло посиленню прозорості розподілу бюджетних коштів та підвищенню ефективності їх використання, а з іншого – ці механізми почали відігравати роль інструментів посилення контролю над стратегічними напрямками розвитку вищої освіти та наукових досліджень.

Запропоновано класифікацію реформ фінансування вищої освіти за суб'єктами взаємодії та механізмами їх реалізації.

Ключові слова: фінансування вищої освіти; реформи; ОЕСР; *cost-sharing*; плата за навчання; формульне фінансування; результативно-орієнтоване фінансування.

O. V. HRYHORASH

PhD in Economics, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Finance, Banking and Insurance
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0002-8089-3755

**REFORMS OF HIGHER EDUCATION FUNDING IN OECD COUNTRIES:
ANALYSIS OF MECHANISMS AND CLASSIFICATION OF APPROACHES**

This article reviews approaches to reforming higher education financing systems in OECD countries in the context of expanding access to higher education and increasing fiscal constraints. In line with the research objective, the study examines the core features of key reforms, taking into account changes in the relationships between the state, higher education institutions, and students, and develops a classification of the relevant financing mechanisms. The analysis draws on analytical materials published by the OECD and the European Commission. The main drivers of reform are identified, including budgetary pressures, growing student enrolment, increasing demands for transparency and efficiency in public spending, the rising importance of research and innovation, and the need to expand university autonomy.

At the level of state–student relations, reforms have been implemented through *cost-sharing* mechanisms, including direct measures (the introduction or increase of tuition fees and deferred payment schemes) and indirect measures (reductions in grants, the replacement of grants with student loans, limitations on publicly funded study places, and the transfer of ancillary study-related costs to students). These reforms have aimed to reduce the role of the state in financing higher education and to shift part of the financial responsibility for education to students.



© О. В. Григораши, 2026

Стаття поширюється на умовах відкритої ліцензії CC BY 4.0

At the level of state–higher education institution relations, a shift from line-item budgeting towards governance through funding instruments has taken place, including the expansion of formula-based funding, block grants, performance-based funding, contractual arrangements, and competitive project funding. While these mechanisms have enhanced transparency and efficiency in the allocation of public resources, they have also become tools for strengthening strategic steering over the development of higher education and research.

A classification of higher education financing reforms based on the actors involved and the mechanisms of implementation is proposed.

Key words: higher education financing; reforms; OECD; cost-sharing; tuition fees; formula-based funding; performance-based funding.

Постановка проблеми

Вища освіта – одна з основоположних сфер суспільних відносин, оскільки забезпечує не лише загальний рівень освіченості населення, а й підготовку фахівців, які в подальшому стануть рушіями науково-технічного прогресу відповідно до напрямів розвитку держави. Важко переоцінити значення якості освітніх послуг для суспільства в умовах глобалізації. Протягом останніх трьох десятиліть системи фінансування вищої освіти в країнах ОЕСР зазнали глибокої структурної трансформації під впливом, з одного боку, розширення доступу до вищої освіти, а з іншого – фіскальних обмежень, зростання витрат на дослідження та посилення міжнародної конкуренції за людський капітал. Реформи вплинули на два рівні організації вищої освіти: на взаємодію держави і закладів освіти в частині розподілу бюджетних ресурсів та взаємодію інституцій із здобувачами освіти щодо оплати освітніх послуг.

Традиційна інституційна модель, що ґрунтувалася переважно на стабільному утриманні закладів освіти за рахунок державних коштів на основі нормативно визначеного рівня видатків відповідно до потреб установи (input-based funding), поступово зазнала трансформації у напрямі орієнтації на ринковий попит та була замінена змішаними механізмами фінансування. За таких умов кошти за надання освітніх послуг стали повністю або частково розподіляються між державою та домогосподарствами (cost-sharing і tuition fees), застосовуються формульні та результативно орієнтовані підходи (performance-based funding), а також контрактні угоди між урядами та університетами, що супроводжується розширенням фінансової автономії інституцій та підвищення рівня їх звітності. Водночас заклади вищої освіти активізували курс на диверсифікацію джерел надходжень через надання освітніх послуг іноземним студентам, залучення зовнішніх грантів та розширення співпраці з бізнесом.

За цих умов виникає необхідність аналізу реформ, які реалізовувалися у країнах ОЕСР, з урахуванням змін у характері взаємодії між державою, освітніми інституціями та здобувачами освіти та зростання ролі приватного фінансування шляхом залучення домогосподарств до оплати освітніх послуг

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання запровадження реформ у сфері фінансування вищої освіти широко обговорюється у науковій літературі як вітчизняними авторами, так і зарубіжними. Ряд авторів розглядають реформування як відповідь на розширення доступу до вищої освіти з одночасною обмеженістю державних ресурсів, що зумовило пошук нових моделей розподілу фінансової відповідальності за надання освітніх послуг між державою, закладами вищої освіти та здобувачами освіти [1, 2]. Із розвитком механізмів фінансування вони стали перетворюватися не лише на спосіб залучення ресурсів, а на інструмент управління поведінкою учасників освітніх систем.

Значна частина публікацій присвячена трансформації відносин між державою та університетами, зокрема переходу від історичного (інституційного, постатейного) бюджетування до формульного, результативно-орієнтованого та контрактного фінансування [1, 3, 4].

Паралельно досліджуються реформи, спрямовані на зміну фінансових відносин між державою та отримувачами освітніх послуг, включаючи запровадження або розширення плати за навчання та інші механізми розподілу фінансових зобов'язань за оплату освітніх послуг, а також непрямі способи зростання приватного фінансового навантаження, зокрема через скорочення грантів і зростання ролі кредитів [2, 5]. Загалом порівняльні дослідження показують, що в країнах ОЕСР та Європи переважають тенденції до диверсифікації джерел фінансування та використання фінансування як інструменту стратегічного управління системами вищої освіти [6, 7].

Разом з тим аналіз наукової літератури свідчить, що наявні дослідження не завжди дають цілісне уявлення про сукупність методів і механізмів фінансування вищої освіти, які сформувалися в країнах ОЕСР у результаті впровадження реформ. Це зумовило вибір теми та визначило мету дослідження.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є аналіз реформ фінансування вищої освіти в країнах ОЕСР з урахуванням змін у взаємодії між державою, закладами вищої освіти та здобувачами освіти, а також формування класифікації відповідних механізмів.

Досягнення мети потребує виконання завдань:

- 1) визначити основні передумови реформування систем фінансування вищої освіти в країнах ОЕСР;
- 2) охарактеризувати зміст реформ та проаналізувати механізми фінансування, запроваджені у взаємовідносинах між державою, закладами вищої освіти та здобувачами освіти;
- 3) сформувати класифікацію реформ фінансування вищої освіти за суб'єктами взаємодії та механізмами їх реалізації.

Викладення основного матеріалу дослідження

Будь-яка система потребує змін. Система вищої освіти є особливо чутливою до змін у ринковій кон'юктурі, оскільки оперативно реагує на попит на освітні послуги у галузях знань, що користуються підвищеним попитом на ринку праці. Держава як головний інвестор у підготовку кадрів для стратегічно важливих сфер економіки та суспільства зацікавлена у всебічній підтримці високої якості освітнього процесу. Водночас фінансування вищої освіти є лише одним із напрямів бюджетної політики уряду. Відтак, виникає необхідність ухвалення зважених рішень щодо обсягів можливих інвестицій у розвиток сфери вищої освіти та науки. Повне державне забезпечення університетів з часом стало обтяжливим для бюджетів навіть країн з високим рівнем економічного розвитку. За цих умов системи фінансування вищої освіти потребували структурних змін.

Більшість країн ОЕСР у різні періоди стикнулися з низкою викликів, що поступово підштовхнули їх до переходу від традиційних моделей державного утримання університетів до більш диверсифікованих, орієнтованих на ринок та визначені пріоритети.

Реформування систем фінансування вищої освіти в країнах ОЕСР та Європи не є результатом поодиноких політичних рішень, а є наслідком довготривалих структурних змін у ролі освітніх інституцій, масштабах участі населення у здобутті вищої освіти та фінансальних обмеженнях державних бюджетів, які зумовили необхідність трансформації підходів до фінансування вищої освіти.

Насамперед ключовим драйвером реформ стали фінансові обмеження державних коштів та зростаючий тиск на бюджети. У більшості країн частка бюджетних ресурсів, доступних для фінансування вищої освіти, скорочувалася внаслідок зростання витрат на соціальний захист, охорону здоров'я, безпеку, утримання пенсійних систем тощо. За таких умов університети дедалі частіше стикалися з бюджетними дефіцитами та нестачею коштів для покриття повної вартості навчальної й дослідницької діяльності. Це спричинило пошук альтернативних джерел доходів і стало підґрунтям для зміщення політики з централізованого фінансування підготовки здобувачів у бік розподілу витрат між державою та домогосподарствами, включно із запровадженням або підвищенням плати за навчання та активнішим залученням приватних ресурсів [2, 7].

Другим важливим чинником стало зростання популярності вищої освіти та розширення доступу до неї. Це суттєво збільшило навантаження на університетські бюджети. Моделі фінансування, побудовані на кошторисах або нормативах фінансового забезпечення, виявилися недостатньо гнучкими для забезпечення сталого функціонування систем. Як наслідок, уряди почали впроваджувати формульні механізми розподілу ресурсів та шукати інструменти підвищення ефективності використання коштів у розрахунку на одного студента [1, 2].

Третій блок причин пов'язаний із зростанням вимог до прозорості розподілу бюджетних ресурсів та ефективності державних витрат, які не забезпечувала система історичного або ресурсного (input-based) бюджетування. Виникла потреба у застосуванні чітко визначеного набору критеріїв та вимірюваних результатів, на основі яких розподіл фінансування міг би здійснюватися більш об'єктивно, наприклад, кількість випускників, наукових публікацій, обсяг залучених грантів тощо. Таким чином, фінансування почало розглядатися як інструмент стимулювання продуктивності та результативності діяльності університетів [1, 3, 8].

Ще одним стимулом для реформ (четвертий блок) стало посилення ролі університетів у проведенні наукових досліджень та реалізації інноваційних проєктів. В умовах глобальної конкуренції університети прагнуть залучити найбільш обдарованих здобувачів освіти та викладачів як усередині країни, так і з-за кордону. Це стимулює акумуляцію ресурсів через гранти та цільове фінансування досліджень для забезпечення вищої якості освіти і стратегічної спрямованості дослідницької діяльності університетів [2, 3, 7].

Нарешті, п'ятою важливою передумовою трансформацій стала потреба в розширенні інституційної автономії. Централізоване регулювання і жорстке постатейне бюджетування часто розглядаються як бар'єри для ефективного управління ресурсами. У відповідь багато країн перейшли до моделі блокових грантів і надали університетам більшу свободу у внутрішньому розподілі коштів. Паралельно з розширенням автономії посилювався контроль за використанням ресурсів шляхом укладання контрактів на досягнення визначених показників результативності [1, 3].

Як уже зазначалося, у науковій літературі виділяють модель державного фінансування, за якої заклади вищої освіти переважно залежать від централізованих публічних ресурсів, а держава здійснює безпосередній контроль за обсягами та напрямками використання коштів, та модель приватного фінансування, за якої джерелами надходжень є виключно залучені закладами освіти фінансові ресурси, якими вони розпоряджаються на власний розсуд. Очевидно, ані одна, ані інша модель у чистому вигляді практично не застосовується у країнах світу. Тому в літературі переважає опис змішаної моделі фінансування, що поєднує державні та приватні джерела і розглядається як домінантна у більшості розвинених країн.

Питання фінансового забезпечення вищої освіти необхідно розглядати з як позиції взаємовідносин держави і закладів вищої освіти, так і з позиції взаємовідносин між державою і здобувачами освітніх послуг. Відтак, розглянемо реформи в системах фінансування вищої освіти, запроваджені у країнах ОЕСР, з позиції їх впливу на фінансову навантаження здобувачів освіти та можливостей доступу до ресурсів освітніх інституцій.

Розширення доступу до вищої освіти, з одного боку, та посилення фінансальних обмежень – з іншого [9], зумовили поширення методу управління фінансовими ресурсами *cost-sharing*, у межах якого фінансова відповідальність за надання вищої освіти перерозподіляється між державою та отримувачами освітніх послуг (студентами та їхніми сім'ями) [2, 5, 11].

Розглянемо основні механізми, які набули розвитку у країнах світу внаслідок впровадження реформ та стосуються прямого перенесення частини вартості освітньої послуги на студентів та їхні домогосподарства.

Прямі механізми перенесення вартості освітніх послуг на здобувачів освіти

У літературі прямі методи перенесення вартості на студентів описуються як політичні рішення, за яких частина або повна вартість підготовки студента, що раніше покривалася державним бюджетом, безпосередньо перекладається на студентів або їхні домогосподарства. Найбільш поширеним і чітко ідентифікованим способом такого перенесення є запровадження плати за навчання (*tuition fees*) у системах, де вища освіта раніше була безкоштовною. Зокрема, у Великій Британії (Англії) плата за навчання була вперше введена у 1998 році, що означало перехід від повного бюджетного покриття витрат на підготовку студента до часткової фінансової участі домогосподарств у фінансуванні вищої освіти. Аналогічна реформа була реалізована в Китаї у 1997 році, коли система формально безкоштовної вищої освіти була замінена універсальною платою за навчання для всіх студентів [5].

Ще одним прямим методом є суттєве підвищення вже існуючої плати за навчання, коли плата за навчання (*tuition fees*) формально існувала і раніше, але її рівень після реформ значно зріс, істотно змінюючи співвідношення між державними і приватними джерелами фінансування. Така динаміка була характерною, зокрема, для державних університетів США у 1990-х – на початку 2000-х років, де скорочення бюджетної підтримки з боку штатів компенсувалося зростанням плати за навчання для студентів [5].

Окрему форму прямого перенесення вартості становить запровадження обов'язкових фінансових зобов'язань з відкладеним платежем, коли студент формально не сплачує повну вартість навчання під час здобуття освіти, але бере на себе юридичне зобов'язання її відшкодування після завершення навчання. Класичним прикладом такого підходу є система HECS в Австралії, запроваджена у 1989 році, за якої студенти зобов'язані компенсувати вартість навчання через виплати (*income-contingent repayments*) після виходу на ринок праці. У цьому випадку перенесення вартості має прямий характер, оскільки саме студенти, а не держава, у підсумку несуть витрати на власну підготовку, хоча й у відкладеній у часі формі [5, 10].

Непрямі методи перенесення вартості освітніх послуг на здобувачів освіти

У результаті впровадження реформ фінансування вищої освіти набули поширення також непрямі методи перенесення вартості, за яких формально зберігається повне або часткове бюджетне фінансування надання освітньої послуги, однак реальна частка витрат, покладених на здобувачів освіти, зростає. На відміну від прямих методів, такі зміни не завжди супроводжуються введенням нової плати за навчання, проте мають подібний ефект з точки зору фінансового навантаження на студентів.

Одним із найчастіше описуваних у літературі непрямих методів є зменшення обсягів грантів і стипендій, які раніше частково або повністю компенсували витрати студентів на навчання та проживання. У Великій Британії відносно щедра система грантів, що існувала до початку масштабних реформ, поступово була скорочена, а згодом фактично скасована, що призвело до зростання приватних витрат студентів навіть за відсутності підвищення плати за навчання. Запровадження подібних механізмів скорочення грантової підтримки описується також для країн Центральної і Східної Європи після 1990-х років [5].

Тісно пов'язаним з попереднім напрямом реформ є заміна безповоротної фінансової допомоги студентськими кредитами та відшкодовуваною студентською допомогою (*repayable student support*) [2, 9]. Хоча кредити формально не є платою за навчання, така форма фінансової допомоги передбачає подальше повернення основної суми кредиту та відсотків за користування ним, тобто переносить фінансові ризики та зобов'язання з держави на здобувачів освітніх послуг. Наголошується, що така допомога перетворилася на домінуючий інструмент фінансування вищої освіти в окремих країнах, зокрема в Австралії [10].

Ще одним непрямим каналом перенесення вартості є скорочення державного фінансування в розрахунок на одного студента без формального зменшення загальних бюджетних витрат. В аналітичних звітах ОЕСР зазначається, що в багатьох країнах Європи зростання чисельності студентів не супроводжувалося пропорційним збільшенням державних видатків, що змушувало університети компенсувати дефіцит ресурсів через залучення приватних коштів, у тому числі від студентів [1, 7].

У ряді країн непряме перенесення витрат також пов'язане з обмеженням кількості повністю бюджетних місць у секторі вищої освіти. За умов зростання попиту держава не розширює обсяги повністю фінансованих програм, у результаті чого надлишковий попит задовольняється через платні програми або приватні заклади. Цей механізм як поєднання обмеження масштабів публічного сектору з одночасним заохоченням розвитку оплачуваної приватної вищої освіти, що характерно, зокрема, для Японії, Південної Кореї та низки країн Латинської Америки [5].

Окрему групу непрямих реформ становить перекладання на студентів супутніх витрат навчання, пов'язаних із проживанням, харчуванням та іншими послугами, які раніше частково або повністю компенсувалися державою.

У матеріалах ОЕСР підкреслюється, що такі витрати є важливою складовою загального фінансового навантаження студентів, хоча вони не завжди відображаються безпосередньо в політиці плати за навчання [6]. У ряді країн, зокрема в Китаї та країнах Північної Європи, навіть за формально безкоштовної вищої освіти значна частина витрат на участь у навчанні покривається студентами, часто за рахунок кредитів [5].

Реформи фінансування у взаємовідносинах між державою та закладами вищої освіти

Реформи відбулися також у контексті відносин між державою та освітніми інституціями. Зокрема, у літературі описується перехід від моделі повного бюджетного утримання інституцій до використання фінансування як інструменту управління, стимулювання та стратегічного спрямування діяльності закладів вищої освіти [1, 3].

Одним із ключових напрямів реформ став перехід до формульного фінансування, за якого розподіл публічних коштів між університетами здійснюється на основі прозорих формалізованих формул, що враховують кількісні показники діяльності закладів, зокрема обсяги освітньої діяльності, результати досліджень та ін. [1, 3]. Такі підходи були запроваджені в багатьох європейських країнах і країнах ОЕСР з метою підвищення ефективності використання бюджетних коштів та зменшення ролі постатейного фінансування видатків на утримання закладів вищої освіти.

Тісно пов'язаним із формульним фінансуванням є результативно орієнтоване (performance-based) фінансування, за якого частина або весь обсяг державних коштів, що надаються закладам вищої освіти, залежить від досягнення університетами визначених показників результативності, таких як кількість випускників, показники успішності навчання або наукові результати (OECD, 2007; Salmi, 2009). У звітах ОЕСР підкреслюється, що в таких моделях держава використовує фінансування як інструмент стимулювання та непрямого управління університетами без застосування прямого адміністративного втручання. Водночас у науковій літературі зазначається, що надмірна орієнтація на результативно-орієнтовані та контрактні механізми фінансування може призводити до формального виконання показників і не завжди відображає реальну якість освітньої та наукової діяльності університетів [8, 12, 13].

Ще одним важливим наслідком впровадження реформ стало використання фінансування у формі block grants. У межах цього підходу університети отримують загальний обсяг коштів і самостійно визначають напрями внутрішнього розподілу ресурсів, що суттєво розширює їхню фінансову автономію [1, 4]. Європейська комісія зазначає, що block grants часто поєднуються з формульним або результативно орієнтованим фінансуванням, утворюючи комплексні моделі управління через фінансування [3].

Окремий напрям реформ пов'язаний із контрактними механізмами фінансування (performance agreements або performance contracts) між державою та університетами. Такі угоди фіксують стратегічні цілі, очікувані результати та відповідні параметри фінансування, що трансформуює відносини «держава – університет» з адміністративно-управлінських у договірні [1, 3]. Це механізм, що поєднує розширення інституційної автономії з підвищенням відповідальності та підзвітності за досягнення узгоджених показників.

Крім того, у процесі реформ посилилася роль проектного фінансування, передусім у сфері наукових досліджень та інституційного розвитку. Частина державних ресурсів почала розподілятися на конкурсній основі, що посилює конкуренцію між університетами та сприяло концентрації фінансування на пріоритетних напрямках [4, 9]. Такі інструменти дедалі частіше використовуються як доповнення до базового фінансування університетів [1].

Проведений аналіз свідчить, що реформи фінансування суттєво змінили характер взаємодії між державою та університетами. Класифікація реформ фінансування вищої освіти за суб'єктами взаємодії та механізмами їх реалізації представлена в табл. 1.

Таблиця 1

Класифікація реформ фінансування вищої освіти за суб'єктами взаємодії та механізмами їх реалізації

Тип механізму	Основні інструменти	Характер впливу
Рівень взаємодії	Держава – здобувачі освіти	
Прямі методи перенесення вартості	Tuition fees; підвищення плати; відкладені платежі	Безпосереднє зростання фінансових витрат студентів
Непрямі методи перенесення вартості	Скорочення грантів; заміна грантів кредитами; обмеження бюджетних місць; перекидання супутніх витрат	Формальне збереження бюджетного фінансування за фактичного зростання приватних витрат
Рівень взаємодії	Держава – освітні інституції	
Базове бюджетне фінансування	Постатейне бюджетування; block grants	Стабільне фінансування
Формульний розподіл коштів	Формульне фінансування за кількісними показниками	Прозорість та передбачуваність витрат
Результативно-орієнтоване фінансування	Performance-based funding	Стимулювання результативності та спрямованості на визначені державою результати
Договірні механізми	Performance agreements / contracts	Стратегічне управління розвитком ЗВО
Проектне та конкурсне фінансування	Гранти, competitive funding	Концентрація ресурсів на пріоритетах

Джерело: складно автором на основі даних [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9.]

Таким чином, реформи фінансування вищої освіти в країнах ОЕСР можуть бути згруповані за двома взаємопов'язаними напрямками впливу держави. Перший напрям стосується перерозподілу фінансового навантаження між державою та здобувачами освіти і реалізується через прямі та непрямі механізми розподілу вартості освітніх послуг за рівнем участі здобувачів у фінансуванні освітніх послуг. Другий напрям пов'язаний зі зміною характеру взаємодії між державою та закладами вищої освіти і полягає у використанні фінансування як інструменту управління, стимулювання результативності та стратегічного розвитку університетів. Поєднання цих двох груп механізмів формує різні механізми фінансування вищої освіти.

Висновки

Відповідно до поставленої мети у статті здійснено аналіз реформ фінансування вищої освіти в країнах ОЕСР, що дозволило узагальнити основні напрями трансформації систем фінансування в умовах зростання попиту на вищу освіту та фіскальних обмежень. Визначено, що реформи мали системний характер і були спрямовані як на перерозподіл фінансового навантаження між державою та здобувачами освіти, так і на зміну механізмів взаємодії між державою та закладами вищої освіти.

Встановлено, що у сфері взаємодії зі здобувачами освіти домінуючою тенденцією стало розширення механізмів cost-sharing, які реалізовувалися через поєднання прямих і непрямих методів перенесення частини вартості освітніх послуг на домогосподарства. Водночас у відносинах між державою та закладами вищої освіти відбувся перехід від моделі бюджетного утримання до використання фінансування як інструменту стратегічного управління, що реалізовувалося через поширення формульного, результативно-орієнтованого, договірної та проектного фінансування.

Список використаної літератури

1. OECD. Education at a Glance 2007: OECD Indicators. Paris : OECD Publishing, 2007.
2. Zhang L., Hu S., McMahon W. The financing of higher education. In: Handbook of the Economics of Education. Vol. 5. Amsterdam : Elsevier, 2016. P. 445–504.
3. European Commission. Modernisation of Higher Education in Europe: Academic Staff – 2017. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2017.
4. Salmi J. The Challenge of Establishing World-Class Universities. Washington, DC : World Bank, 2009.
5. Johnstone D. B. Financing Higher Education: Cost-sharing in International Perspective. Rotterdam : Sense Publishers, 2006.
6. OECD. Education at a Glance 2017: OECD Indicators. Paris : OECD Publishing, 2017.
7. OECD. Education at a Glance 2025: OECD Indicators. Paris : OECD Publishing, 2025.
8. Kettunen J. Performance-based funding and university performance: Evidence from Finland. In: Proceedings of the Strategica International Conference. Bucharest, 2022. P. 123–132.
9. Zatonatska T., Dluhopolskyi O., Chygryn O. Higher education financing reforms: International experience and implications for transition economies. Public and Municipal Finance. 2019. Vol. 8, No. 1. P. 1–10.
10. Johnstone D. B. Cost-sharing and equity in higher education: Implications of income contingent loans. Higher Education in Europe. 2004. Vol. 29, No. 3. P. 403–410.
11. Rehman H. Cost-sharing in higher education: International trends and policy implications. Journal of Higher Education Policy and Management. 2020. Vol. 42, No. 3. P. 245–260.
12. OECD. Performance-based Funding for Public Research in Tertiary Education Institutions. Paris : OECD Publishing, 2010.
13. Matveeva A. Performance-based funding in higher education: A meta-narrative review. 2025. DOI: 10.1007/s11233-025-09151-y

References

1. OECD (2007) *Education at a Glance 2007: OECD Indicators*. Paris: OECD.
2. Zhang L., Hu S., McMahon W. (2016) The financing of higher education. In: *Handbook of the Economics of Education*, vol. 5. Amsterdam: Elsevier, pp. 445–504.
3. European Commission (2017) *Modernisation of Higher Education in Europe: Academic Staff* – 2017. Luxembourg : Publications Office of the European Union.
4. Salmi J. (2009) *The Challenge of Establishing World-Class Universities*. Washington, DC: World Bank.
5. Johnstone D. B. (2006) *Financing Higher Education: Cost-sharing in International Perspective*. Rotterdam : Sense Publishers.
6. OECD (2017) *Education at a Glance 2017: OECD Indicators*. Paris : OECD.
7. OECD (2025) *Education at a Glance 2025: OECD Indicators*. Paris : OECD.
8. Kettunen J. (2022) Performance-based funding and university performance: Evidence from Finland. In: *Proceedings of the Strategica International Conference*. Bucharest, pp. 123–132.

9. Zatonatska T., Dluhopolskyi O., Chygryn O. (2019) Higher education financing reforms: International experience and implications for transition economies. *Public and Municipal Finance*, vol. 8, no. 1, pp. 1–10.
10. Johnstone D. B. (2004) Cost-sharing and equity in higher education: Implications of income contingent loans. *Higher Education in Europe*, vol. 29, no. 3, pp. 403–410.
11. Rehman H. (2020) Cost-sharing in higher education: International trends and policy implications. *Journal of Higher Education Policy and Management*, vol. 42, no. 3, pp. 245–260.
12. OECD (2010) *Performance-based Funding for Public Research in Tertiary Education Institutions*. Paris: OECD.
13. Matveeva A. (2025) Performance-based funding in higher education: A meta-narrative review. DOI: 10.1007/s11233-025-09151-y

Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

В. М. ДЕМЧЕНКО

кандидат філологічних наук, доцент,
доцент кафедри державного управління і місцевого самоврядування
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-1841-7798

ДЕРЖАВНА ПОЛІТИКА В ГАЛУЗІ НАЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

У статті досліджено стан національної безпеки в Україні в умовах воєнного стану – відповідно до положень законодавства та узагальнення результатів досліджень українських науковців. Визначено, що національна безпека не лише передбачає захист інтересів громадян, суспільства й держави, але й спрямована на виявлення, запобігання й нейтралізацію загроз національним інтересам. З'ясовано, що воєнна складова національної безпеки в Україні виявляє оборонний тип, що передбачає недопущення зовнішньої воєнної загрози. Тобто воєнна захищеність держави стає загальною вимогою національної безпеки. Зауважено, що в умовах воєнного стану діяльність держави у сфері національної безпеки має певні обмеження – комендантську годину, перевірки документів, огляд речей, транспортних засобів, вантажів, житла, режиму пересування транспортних засобів і громадян, але все це відбувається відповідно до головної функції держави – захисту її суверенітету та територіальної цілісності.

Зроблено висновок, що вдосконалення системи воєнної безпеки позитивно впливатиме й на забезпечення національної безпеки України. Таким може бути використання здобутків космічної промисловості (для виготовлення супутників, створення наземної інфраструктури), результатів наукових досліджень (для вдосконалення воєнної безпеки), неперервного навчального процесу для підготовки фахового складу, бойових навичок і матеріально-технічного забезпечення, інноваційних засобів управління, інформаційних технологій, нових підходів у забезпеченні національної безпеки, нормативно-правових, наукових і управлінських важелів держави.

Ключові слова: національна безпека, воєнна безпека, державна політика, публічне управління, публічна влада, механізми, інструменти, інформаційно-комунікаційні технології, воєнна адміністрація, модернізація, розвиток, інновації, взаємодія, суспільство.

V. M. DEMCHENKO

Candidate of Philological Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of State Administration
and Local Self-Government
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-1841-7798

STATE POLICY IN THE NATIONAL SECURITY DIRECTION UNDER MARTIAL LAW

The article examines the state of national security in Ukraine under martial law – in accordance with the provisions of the legislation and the generalization of the results of research by Ukrainian scientists. It is determined that national security not only involves the protection of the interests of citizens, society and the state, but is also aimed at identifying, preventing and neutralizing threats to national interests. It is found that the military component of national security in Ukraine exhibits a defensive type, which involves preventing an external military threat. That is, the military security of the state becomes a general requirement of national security. It is noted that under martial law, the state's activities in the field of national security have certain restrictions – curfew, document checks, inspection of things, vehicles, cargo, housing, the regime of movement of vehicles and citizens, but all this occurs in accordance with the main function of the state – the protection of its sovereignty and territorial integrity.

It is concluded that the improvement of the military security system will also have a positive impact on ensuring the national security of Ukraine. This may include the use of the achievements of the space industry (for the manufacture of satellites, the creation of ground infrastructure), the results of scientific research (for the improvement of military security), a continuous educational process for the training of professional personnel, combat skills and logistical support, innovative management tools, information technologies, new approaches to ensuring national security, regulatory, scientific and managerial levers of the state.

Key words: national security, military security, state policy, public administration, public power, mechanisms, tools, information and communication technologies, military administration, modernization, development, innovations, interaction, society.



Постановка проблеми

В умовах воєнного стану система національної безпеки України складається з органів публічної влади (далі – ПВ), органів місцевого самоврядування, військових адміністрацій, громадських організацій, які здійснюють визначені законом дії в різних галузях суспільного життя – управлінській, інформаційній, економічній тощо. Якщо говорити про функції з оборони держави, то ними є відсіч агресору, і не лише на полі бою, але й в інформаційному просторі. Тобто з метою відновлення державного суверенітету й територіальної цілісності вживаються як воєнні заходи, так і інформаційні. Головним же завданням є згуртування українського народу для такої відсічі агресорові, для чого потрібна чітка взаємодія громадянського суспільства, ПВ і військових формувань.

У науці публічного управління традиційні питання національної безпеки України доповнюються теоретичними та практичними розробками у сфері вже політики воєнної безпеки в контексті трансформації та модернізації українського війська й суспільства. Тобто всі рекомендації та пропозиції, що вироблені дослідниками, можуть бути використані в реальній діяльності органів ПВ, і не лише у площині розвитку воєнного потенціалу держави, але й загалом у потенційному розвитку її національної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання національної безпеки України в теоретичному та практичному аспектах вивчають О. Данільян, О. Дзьобань та М. Панов [1], В. Богданович, І. Романченко, І. Свида [2], Г. Костенко [3], О. Дузь-Крятченко [4], О. Васильчишин [5], з правового боку це питання досліджує П. Діхтієвський [6]. В умовах воєнного часу національна безпека має воєнне спрямування, що зумовлює увагу держави на вдосконаленні її воєнного потенціалу в усій його різноманітності. Ці питання досліджують М. Ковалів та В. Іваха [7], Ю. Луценко [8], О. Пархоменко-Кущевіч [9], А. Семенченко [10] та інші українські вчені.

До здобутків учених у цій сфері варто додати чинну нормативно-правову базу, яка доводить пильну увагу Держави до питань національної безпеки, зокрема й воєнної її площини. Це зокрема Конституція України [11], закони України «Про основи національної безпеки України» [12], «Про оборону України» [13], «Про правовий режим воєнного стану» [14] та інші закони й підзаконні акти публічної влади. Тобто дослідження питань національної безпеки України й зокрема її актуального воєнного аспекту потребує комплексного аналізу.

Формулювання мети дослідження

Мета статті – проаналізувати особливості державної політики України в галузі національної безпеки в сучасних умовах воєнного стану.

Викладення основного матеріалу дослідження

Стан національної безпеки залежить від різних ситуацій у країні – як мирних, так і надзвичайних, від економічного стану держави, рівня суспільства, внутрішньої та зовнішньої політики, що включає питання не лише економічної, інформаційної, екологічної, політичної, але й воєнної сфер. Зокрема Закон «Про основи національної безпеки України» захист національних інтересів держави від зовнішніх та внутрішніх загроз передбачає в діяльності органів ПУ в умовах контролю з боку громадянського суспільства [12]. Серед суб'єктів влади – Президент України, Верховна Рада, Рада національної безпеки й оборони, Кабінет Міністрів, Міністерство оборони, правоохоронні органи, інші центральні органи виконавчої влади, органи місцевого самоврядування, підприємства, установи та організації, окремі громадяни, але й Генеральний Штаб ЗС України та інші військові формування [12].

У структурі сектору національної безпеки А. Семенченко називає силовий блок та оборонно-промислові й наукові структури, органи ПУ й місцевого самоуправління, де виокремлюється система безпеки, що займається управлінською, інформаційною, екологічною, економічною сферами тощо, – відповідно до Конституції України та відповідних законів [10].

За Законом України «Про основи національної безпеки України», поняття «національна безпека» передбачає захист життєво важливих інтересів громадян, суспільства й держави, тобто забезпечення їх розвитку, а також виявлення, запобігання і нейтралізацію загроз національним інтересам у різноманітних сферах – правоохоронній, охорони здоров'я, освіти й науки, науково-технічної політики, культурного розвитку, інформаційної безпеки, соціальної політики, фінансовій, підприємницькій, банківській, сільського господарства, транспорту та зв'язку, енергетики, земельної та водної, екологічної, публічного управління – в умовах потенційної чи реальної загрози національним інтересам [12].

Відповідно до зазначеного Закону суб'єктами забезпечення національної безпеки є Президент України, Верховна Рада, Кабінет Міністрів, Рада національної безпеки і оборони, міністерства й інші центральні органи виконавчої влади, Національний банк, суди, прокуратура, місцеві державні адміністрації та органи місцевого самоврядування, Збройні Сили України, Служба безпеки, Державна прикордонна служба та інші військові формування.

За управлінським виміром, система національної безпеки розподіляє суб'єктів на таких, які мають державновладні повноваження, і які їх не мають (можуть мати делеговані державновладні повноваження). Також серед суб'єктів визначаються як держава в особі державних організацій, недержавні організації, так і міжнародні організації. При цьому увага ПВ у сфері національної безпеки України має передбачати поєднання діяльності означених

суб'єктів. І. Боднар зазначає, що має бути законодавчий захист прав усіх суб'єктів безпекових відносин, а також чітке визначення завдань, які перед ними стоять. Наприклад, у системи національної безпеки в інформаційній сфері виділяємо реалізацію системи інформаційної безпеки, урахування й аналіз інформаційних загроз, забезпечення права громадян на достовірну, повну та своєчасну інформацію, свободу слова, інформаційної діяльності в національному просторі, удосконалення вітчизняного національного інформаційного продукту, національно-духовних і культурних цінностей України; забезпечення національно-культурної ідентифікації України у світовому інформаційному просторі, державна підтримка вітчизняних інформаційних технологій [15].

Об'єктами національної безпеки визначено конституційні права і свободи громадян, духовні, морально-етичні, культурні, історичні цінності суспільства, інформаційний простір, довколишнє природне середовище; конституційний устрій, суверенітет, територіальна цілісність і недоторканність держави. Така політика реалізується відповідно до державних концепцій, стратегій і програм, які покривають різні сфери – політичну, економічну, соціальну, екологічну, науково-технологічну, інформаційну, безпекову. Відповідно система поділяється на різновиди безпеки – економічну, воєнну, технологічну, екологічну, гуманітарну, демографічну, інформаційну, енергетичну [12].

Зрештою ключове слово «безпека» позначає стан, коли ніщо не загрожує, що пов'язано з попереднім виявленням, запобіганням, послабленням, усуненням і відверненням загроз для людей, матеріальних і духовних ресурсів. Така безпека в сучасному суспільстві отримала назву національної безпеки та стала одним з основних мотивів життєдіяльності людей.

Серед чинників державного управління у сфері національної безпеки, визначаються демографічний, географічний, економічний, організаційно-адміністративний, історико-соціальний, військовий. І. Боднар додає в інформаційній сфері безпеки розмежування на персональну, суспільну, комерційну й державну складові [15]. У цих площинах має бути створений психологічний комфорт з утвердженням загальнолюдських і національних моральних цінностей, відповідний технологічний розвиток національних інформаційних ресурсів, новітніх технологій створення, оброблення та поширення інформації. Що стосується захисту інформації (зокрема від кібернетичних атак), то саме на це має бути спрямована діяльність держави, адже це сфера національної безпеки.

Що стосується воєнного аспекту безпеки, то О. Пархоменко-Куцевіл відзначає її оборонний тип – недопущення потенційної воєнної загрози державі – на відміну від наступального типу безпеки, що походить від агресивної держави з імперськими традиціями й геополітичними амбіціями [9]. Ю. Луценко визначає воєнну безпеку як складову національної безпеки, і вирішення проблем першої зумовлює вирішення завдань другої, зокрема у сферах політики, економіки, екології, охорони здоров'я, а також духовні, інтелектуальні, демографічні тощо [8]. Група вчених (В. Богданович, І. Романченко, І. Свида) досліджують взаємозв'язок між стабільністю та воєнною безпекою держави й суспільства з виділенням інформаційної складової, що передбачає опрацювання інформації в системі воєнної безпеки України [2]. О. Пархоменко-Куцевіл аналізує економічну складову, що забезпечує функціонування воєнної безпеки, тобто економіка військової сфери пов'язана з економічними ресурсами. Також учений у контексті публічного управління використовує поняття «оборонна безпека», «безпека держави», «публічна безпека», зазначаючи, що вони стають актуальними під час війни, адже настає потреба реагувати на військову загрозу власній державі [9].

Тобто захищеність держави, її суверенітету й території стають загальною вимогою національної безпеки. Так, М. Ковалів і В. Іваха визначають захищеність суспільства від воєнних / будь-яких загроз [7]. Ю. Луценко передбачає запобігання й усунення загроз національній безпеці України та забезпечення захисту національних інтересів на основі відповідних принципів – верховенства права, оборонної достатності, невисування територіальних претензій і невизнання таких претензій, пріоритету договірних засобів у розв'язанні міжнародних конфліктів, своєчасності й адекватності заходів захисту національних інтересів, демократичного цивільного контролю над воєнною організацією держави та правоохоронними органами, відповідності рівня боєздатності потребам оборони, взаємодії органів ПВ, місцевого самоврядування й органів військового управління та розмежування їх повноважень, використання в національних інтересах механізмів міжнародної колективної безпеки [8].

У нормативно-правовому аспекті сферу національної безпеки контролює відповідний Закон від 2003 року – «Про основи національної безпеки України», що визначив засади політики держави в захисті національних інтересів [12]. Поряд із ним потрібно відзначити Закон України «Про суспільне телебачення і радіомовлення України», що говорить про можливість поширення об'єктивної інформації, позитивного ставлення до національної своєрідності, непорушення презумпції невинуватості, нерозголошення інформації про приватне життя, відповідальності за достовірність інформації [16]. До цього Закону після початку війни можна додати ще кілька актів, які декларують питання інформаційного захисту, – рішення Ради національної безпеки і оборони «Щодо реалізації єдиної інформаційної політики в умовах воєнного стану», наказ Головнокомандувача Збройних Сил України «Про організацію взаємодії між Збройними Силами України, іншими складовими сил оборони та представниками засобів масової інформації на час дії правового режиму воєнного стану», Закон України «Про медіа». Ці акти присвячені питанням протидії ворогові з використанням інформації, зокрема протидії дезінформації, тероризму. Отже, система інформаційної безпеки держави складається з відповідних органів державної влади, місцевого

самоврядування, громадських організацій, що здійснюють узгоджені дії на основі правових норм із загальною метою протистояння ворогу-агресору на всіх ділянках гібридної війни.

Якщо розглядати діяльність держави у сфері національної безпеки, зокрема у воєнному контексті, то воєнний стан передбачає певні обмеження відповідно до норм законодавства, що декларує комплекс обмежувальних і примусових заходів для захисту України у воєнних умовах. Такі обмеження зумовлюють певні правові колізії, що примушували представників органів ПВ діяти оперативно із залученням додаткових повноважень. При цьому пріоритетом у їх діяльності залишається забезпечення громадського порядку, охорони прав громадян (біженців, внутрішньо переміщених осіб тощо) щодо особистої недоторканності.

У таких умовах український учений у галузі права П. Діхтєвський перелічує заходи держави в захисті права громадян на особисту недоторканність: запровадження комендантської години відповідно до Порядку здійснення заходів під час запровадження комендантської години та встановлення спеціального режиму світломаскування в окремих місцевостях, де введено воєнний стан; запровадження процедур відповідно до Порядку перевірки документів в осіб, огляду речей, транспортних засобів, багажу та вантажів, службових приміщень і житла громадян під час забезпечення заходів правового режиму воєнного стану; запровадження режиму пересування відповідно до Порядку встановлення особливого режиму в'їзду і виїзду, обмеження свободи пересування громадян, іноземців та осіб без громадянства, а також руху транспортних засобів в Україні або в окремих її місцевостях, де введено воєнний стан; запровадження режиму переміщення громадян відповідно до Порядку встановлення заборони або обмеження на вибір місця перебування чи місця проживання осіб на території, на якій діє воєнний стан. Ці акти, створені на основі Указу Президента про запровадження режиму воєнного стану, регламентують дії ПВ, але з кінцевою метою забезпечення дотримання прав і свобод громадян [6].

За Законом України «Про військово-цивільні адміністрації», ці управлінські структури мають завданням реалізовувати зазначені вище правові обмеження, зокрема щодо перебування громадян на вулицях без документів, перевірки фізичної особи, огляду її речей, транспорту, приміщень, заборони діяльності партій, громадських об'єднань, контролювання телекомунікацій, інформування населення, вилучення вогнепальної зброї, радіоактивних, хімічних речовин, використання сховищ для захисту населення, евакуації людей із небезпечних місць, евакуації підприємств і матеріальних цінностей, забезпечення населення питною водою, продуктами харчування, ліками. Зрештою військові адміністрації припиняють свою діяльність після 30 днів після припинення воєнного стану, а поки що можуть тимчасово обмежувати конституційні права громадян [14].

Керівництво діяльністю військових адміністрацій населених пунктів здійснюють керівники відповідних державних адміністрацій. Серед напрямків діяльності начальника військової адміністрації виділяємо ті, що стосуються національної безпеки: запровадження заходів правового режиму воєнного стану; допомога власникам квартир (будинків) у разі пошкодження їх домівок від бойових дій; сприяння призову громадян на військову та альтернативну службу; сприяння Державній прикордонній службі України; контролювання заборони торгівлі зброєю, хімічними й отруйними речовинами, алкогольними напоями [16].

Отже, якщо розглядати систему воєнної безпеки як частину загальної національної, то вдосконалення першої в контексті актуальних подій для України позитивно впливатиме й на забезпечення її національної безпеки. Це, по-перше, використання набутків космічної промисловості (як для виготовлення супутників, так і створення наземної інфраструктури); по-друге – наукові дослідження з удосконалення воєнної безпеки держави (залучення наявного науково-дослідницького потенціалу); по-третє – формування й розвиток фахового складу за принципом неперервності навчального процесу, через удосконалення бойових навичок і матеріально-технічного забезпечення, оволодіння інноваційними засобами управління, зокрема інформаційними технологіями; по-четверте – використання нових підходів у забезпеченні національної безпеки держави (залучення наукових здобутків, зокрема новітніх інформаційних технологій – інтернетних, телекомунікаційних; по-п'яте – використання організаційних заходів для поліпшення системи безпеки держави, нормативно-правових і наукових, а також управлінських, зокрема на рівні Президента й Кабінету Міністрів.

Висновки

Проаналізувавши теоретичні основи та погляди науковців на реалії національної безпеки в умовах воєнного стану в Україні, а також на діяльність держави в розвитку системи захисту держави, можна зробити відповідні висновки.

1. Поняття «національна безпека» полягає в захисті життєво важливих інтересів громадян, суспільства й держави, тобто забезпеченні їх розвитку, а також у виявленні, запобіганні та нейтралізації загроз національним інтересам у різноманітних сферах – правоохоронній, охорони здоров'я, освіти й науки, науково-технічній політики, культурного розвитку, інформаційної безпеки, соціальної політики, фінансовій, підприємницькій, банківській, сільськогосподарства, транспорту та зв'язку, енергетики, земельної та водної, екологічної, публічного управління – в умовах потенційної чи реальної загрози національним інтересам.

2. Захист національних інтересів від зовнішніх або внутрішніх загроз передбачає відповідну діяльність органів влади, серед яких визначаються Президент України, Верховна Рада, Рада національної безпеки й оборони,

Кабінет Міністрів, Міністерство оборони, правоохоронні органи, інші центральні органи виконавчої влади, органи місцевого самоврядування, підприємства, установи та організації, окремі громадяни, а також Генеральний Штаб Збройних Сил України та інші військові формування. Ці суб'єкти займаються управлінською, інформаційною, екологічною, економічною сферами тощо, а також оборонною в умовах воєнного стану. Зокрема в інформаційній сфері завданнями держави є аналіз і припинення інформаційних загроз, забезпечення права на достовірну, повну та своєчасну інформацію, інформаційну діяльність, захист національно-духовних цінностей України; державна підтримка вітчизняних інформаційних технологій тощо.

3. Об'єктами національної безпеки України законодавчо визначено права і свободи її громадян, духовні, культурні, історичні цінності, інформаційний простір, природне середовище, конституційний лад, суверенітет, територіальну цілісність і недоторканність держави. Відповідно безпекова система поділяється на економічну, воєнну, технологічну, екологічну, гуманітарну, демографічну, інформаційну, енергетичну тощо, які реалізуються відповідно до державних стратегій і програм, які стосуються різних напрямків діяльності держави – політичного, економічного, соціального, екологічного, інформаційного, власне безпекового.

4. Воєнна складова національної безпеки в Україні виявляє оборонний тип, що передбачає недопущення зовнішньої воєнної загрози. Тому вченими досліджується взаємозв'язок між стабільністю державного життя та воєнною безпекою з виділенням інформаційної складової, що передбачає опрацювання інформації в системі воєнної безпеки України, та економічної, що стосується застосування економічних ресурсів у зміцненні воєнної безпеки. Із цього можна зробити висновок, що воєнна захищеність держави стає загальною вимогою національної безпеки із забезпеченням захисту національних інтересів.

5. Реалізація заходів держави зі зміцнення національної безпеки передбачає дотримання відповідних принципів – верховенства права, оборонної достатності, невисування територіальних претензій і невизнання таких претензій, пріоритету договірних засобів у розв'язанні міжнародних конфліктів, своєчасності й адекватності заходів із захисту національних інтересів, демократичного цивільного контролю над воєнною організацією та правоохоронними органами, відповідності рівня боєздатності потребам оборони, використання в національних інтересах механізмів міжнародної колективної безпеки. Тобто ці принципи відповідно до воєнних умов передбачають уже й засади, що стосуються воєнної безпеки держави.

6. В умовах воєнного стану діяльність держави у сфері національної безпеки спрямована на забезпечення дотримання прав і свобод громадян, але з певними законодавчими обмеженнями щодо запровадження комендантської години, перевірки документів, огляду речей, транспортних засобів, вантажів, службових приміщень і житла громадян, режиму пересування транспортних засобів і громадян. Також обмежено діяльність органів місцевої влади, замість яких утворено тимчасові військові адміністрації, що виконують і заходи, що стосуються національної безпеки, – запроваджують правовий режим воєнного стану, допомагають власникам житла в разі його пошкодження, сприяють призову громадян на військову та альтернативну службу, сприяють Державній прикордонній службі України, контролюють обіг зброї, хімічних речовин.

Список використаної літератури

1. Данільян О. Г., Дзьобань О. П., Панов М. І. Національна безпека України. Харків : Фоліо, 2002. 285 с.
2. Богданович В.Ю., Романченко І.С., Свіда І.Ю. Теоретичні основи забезпечення національної безпеки України в умовах позаблоковості: монографія. Львів : АСВ, 2011. 414 с.
3. Костенко Г. Ф. Теоретичні аспекти стратегії національної безпеки : навч. посіб. К. : ЗАТ Вид. дім ДЕМІД, 2002. 144 с.
4. Основи стратегії національної безпеки та оборони держави : підручник / О. Дузь-Крятченко та ін. ; за заг. ред. В. М. Телелима. 3-є вид., перероб. і доп. Київ : НУОУ ім. Івана Черняховського, 2015. 620 с.
5. Національна безпека держави: особливості забезпечення у режимі воєнного стану / О. Васильчишин та ін. *Економічний аналіз*. 2022. Том 32. № 4. С. 289–297. DOI: 10.35774/econp2022.04.289
6. Діхтєвський П.. Адміністративно-правові засоби забезпечення права громадян на особисту недоторканність в період режиму воєнного стану. *Проблеми сучасних трансформацій*. 2022. № 6. DOI: <https://doi.org/10.54929/2786-5746-2022-6-01-13>
7. Ковалів М., Іваха В. Воєнна безпека як чинник стабільності суспільства. *Науковий вісник Львівського державного університету внутрішніх справ*. 2015. № 3. URL: <http://dspace.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234567890/1903/1/3-2015kmvchss.pdf>
8. Луценко Ю. Поняття та зміст воєнної безпеки України у світлі сучасних викликів та загроз. *Актуальні проблеми міжнародних відносин*. 2018. Вип. 137. URL: <http://journals.iir.kiev.ua/index.php/apmv/article/viewFile/3650/3318>
9. Пархоменко-Куцевіл О. Теоретичні засади формування та розвитку воєнної безпеки України. *Літопис Волині*. Всеукраїнський науковий часопис. 2023. Число 28. DOI: <https://doi.org/10.32782/2305-9389/2023.28.53>

10. Семенченко А. Методичний підхід до розробки понять сектора безпеки та Воєнної організації держави, обґрунтування їх призначення, складу, структури та зв'язків між собою. *Вісник Національної академії державного управління при Президентові України*. 2007. № 4. С. 13–30.
11. Конституція України: *Відомості Верховної Ради* від 28 червня 1996 р. № 254к/96-ВР. Ст. 17.
12. Закон України «Про основи національної безпеки України». *Відомості Верховної Ради*. 2003. № 39. Ст. 3.
13. Про оборону України: Закон України від 06.12.1991 № 1932-ХІІ – ВР // *Відомості Верховної Ради України*. 1992. № 9. Ст. 106.
14. Про правовий режим воєнного стану: Закон України від 12 травня 2015 р. № 389-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/389-19#Text>
15. Боднар І. Р. Державна політика та інформаційна безпека України: післякризові виклики. *Актуальні проблеми післякризового відновлення економіки України: Збірник матеріалів наук.-прак. конференції викладацького складу і аспірантів навчально-наукового комплексу «Академія», Л., 2013.*
16. Законодавство України з питань військової сфери. *Збірник законів та інших нормативно-правових актів*. К. : «Азимут-Україна». 2003. 1008 с.

References

1. Danil'yan O. H., Dz'oban' O. P., Panov M. I. (2002) Natsional'na bezpeka Ukrayiny [National Security of Ukraine]. Kharkiv: Folio, 285 s. [in Ukrainian]
2. Bohdanovych V. Yu., Romanchenko I. S., Svyda I. Yu. (2011) Teoretychni osnovy zabezpechennya natsional'noyi bezpeky Ukrayiny v umovakh pozablockovosti : monohrafiya [Theoretical foundations of ensuring national security of Ukraine in non-aligned conditions: monograph]. L'viv: ASV, 414 s. [in Ukrainian]
3. Kostenko H. F. (2002) Teoretychni aspekty stratehiyi natsional'noyi bezpeky : navch. posib [Theoretical aspects of the national security strategy: textbook]. K. : ZAT Vyd. dim DEMID, 144 s. [in Ukrainian]
4. Osnovy stratehiyi natsional'noyi bezpeky ta oborony derzhavy : pidruchnyk (2015) [Fundamentals of the national security strategy and defense of the state: textbook] / O. Duz'-Kryatchenko ta in. ; za zah. red. V. M. Telelyma. 3-e vyd., pererob. i dop. Kyiv : NUOU im. Ivana Chernyakhovskoho, 620 s. [in Ukrainian]
5. Natsional'na bezpeka derzhavy: osoblyvosti zabezpechennya u rezhymy voyennoho stanu (2022) [National security of the state: features of provision during martial law] / O. Vasylychshyn ta in. Ekonomichnyy analiz, 32, 4, 289–297. DOI: [10.35774/econa2022.04.289](https://doi.org/10.35774/econa2022.04.289) [in Ukrainian]
6. Dikhtyievs'kyi P. (2022) Administratyvno-pravovi zasoby zabezpechennya prava hromadyan na osobystu nedotorkannist' v period rezhymu voyennoho stanu [Administrative and legal means of ensuring the right of citizens to personal inviolability during martial law]. Problemy suchasnykh transformatsiy – Problems of modern transformations, 6. DOI: <https://doi.org/10.54929/2786-5746-2022-6-01-13> [in Ukrainian]
7. Kovaliv M., Ivakha V. (2015) Voyenna bezpeka yak chynnnyk stabil'nosti suspil'stva [Military security as a factor of social stability]. Naukovyi visnyk L'vivskoho derzhavnogo universytetu vnutrishnikh sprav – Scientific bulletin of the Lviv State University of Internal Affairs, 3. URL: <http://dspace.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234567890/1903/1/3-2015kmvchss.pdf> [in Ukrainian]
8. Lutsenko Yu. (2018) Ponyattya ta zmist voyennoyi bezpeky Ukrayiny u svitli suchasnykh vyklykiv ta zahroz [The concept and content of military security of Ukraine in the light of modern challenges and threats]. Aktual'ni problemy mizhnarodnykh vidnosyn – Current problems of international relations, 137. URL: <http://journals.iir.kiev.ua/index.php/apmv/article/viewFile/3650/3318> [in Ukrainian]
9. Parkhomenko-Kutsevil O. (2023) Teoretychni zasady formuvannya ta rozvytku voyennoyi bezpeky Ukrayiny [Theoretical principles of the formation and development of military security of Ukraine]. Litopys Volyni. Vseukrayins'kyi naukovyi chasopys – Chronicle of Volyn. All-Ukrainian scientific journal, 28. DOI <https://doi.org/10.32782/2305-9389/2023.28.53> [in Ukrainian]
10. Semenchenko A. (2007) Metodychny pidkhid do rozrobky ponyat' sektora bezpeky ta Voyennoyi orhanizatsiyi derzhavy, obgruntuвання yikh pryznachennya, skladu, struktury ta zv'yazkiv mizh soboyu [Methodical approach to the development of the concepts of the security sector and the Military Organization of the State, substantiation of their purpose, composition, structure and relations between themselves]. Visnyk Natsional'noyi akademiyi derzhavnogo upravlinnya pry Prezidentovi Ukrayiny – Bulletin of the National Academy of Public Administration under the President of Ukraine, 4, 13–30. [in Ukrainian]
11. Konstytutsiya Ukrayiny [Constitution of Ukraine]. Vidomosti Verkhovnoyi Rady vid 28 chervnya 1996 r. № 254k/96-VR, 17 – Verkhovna Rada Bulletin of June 28, 1996 No. 254k/96-VR. Art. 17. [in Ukrainian]
12. Zakon Ukrayiny "Pro osnovy natsional'noyi bezpeky Ukrayiny" [Law of Ukraine "On the Fundamentals of National Security of Ukraine"]. Vidomosti Verkhovnoyi Rady – Verkhovna Rada Bulletin, 2003, 39, 3. [in Ukrainian]

13. Pro oboronu Ukrainy: Zakon Ukrainy vid 06.12.1991 № 1932-XII – VR [On the Defense of Ukraine: Law of Ukraine of December 6, 1991 No. 1932-XII – VR]. Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrainy – Verkhovna Rada Bulletin of Ukraine, 9, 106. [in Ukrainian]

14. Pro pravovyy rezhym voyennoho stanu: Zakon Ukrainy vid 12 travnya 2015 r. № 389-VIII [On the legal regime of martial law: Law of Ukraine of May 12, 2015 No. 389-VIII]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/389-19#Text> [in Ukrainian]

15. Bodnar I. R. (2013) Derzhavna polityka ta informatsiyna bezpeka Ukrainy: pislyakryzovi vyklyky [State policy and information security of Ukraine: post-crisis challenges]. Aktual'ni problemy pislyakryzovoho vidnovlennya ekonomiky Ukrainy: Zbirnyk materialiv nauk.-prak. konferentsiyi vykladats'koho skladu i aspirantiv navchal'no-naukovoho kompleksu “Akademiya” – Current problems of post-crisis recovery of the economy of Ukraine: Collection of materials of the scientific-practical conference of the teaching staff and postgraduate students of the educational and scientific complex “Academy”, L. [in Ukrainian]

16. Zakonodavstvo Ukrainy z pytan' viys'kovoyi sfery. Zbirnyk zakoniv ta inshykh normatyvno-pravovykh aktiv [Legislation of Ukraine on military issues. Collection of laws and other regulatory legal acts]. K. : “Azymut-Ukrayina”. 2003, 1008 s. [in Ukrainian]

Дата першого надходження статті до видання: 10.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

А. С. КАРАПІНКА

аспірант кафедри теоретичної та прикладної економіки

Національний університет «Львівська політехніка»

ORCID: 0009-0009-4968-3037

НЕГАТИВНА РЕГЛАМЕНТАЦІЯ У СТРУКТУРІ МЕХАНІЗМУ РЕГУЛЮВАННЯ ПУБЛІЧНО-ПРИВАТНИХ ВІДНОСИН

У даній статті розглядається один з найважливіших компонентів механізму регулювання публічно-приватних відносин – правове регулювання, зокрема, найбільшій увазі приділяється його негативній формі. Негативна регламентація – це процес упорядкування суспільних відносин шляхом встановлення правил у формі заборон. Обґрунтовується теза про те, що даний метод є характерним інструментом регулювання значного числа сфер публічних відносин, які мають потенціал до інтеграції в них приватних практик та принципів побудови зв'язків між учасниками з переходом до публічно-приватної моделі взаємодії. Виявлено ознаки, що вказують на неефективність витрат ресурсів та часу, а також поставлено під сумнів якість недостатньо забезпеченої діяльності зі здійснення правового регулювання у традиційний позитивний спосіб. Дані ознаки вказують на потребу використання альтернативного шляху до побудови зв'язків у суспільстві, що характеризується наділенням їх учасників можливістю діяти в окреслених заборонами межах у будь-який спосіб за їх вільним вибором. Негативне регулювання, як специфічний акт формалізації волі регулятора у нормах права, вигідно відрізняється від позитивного, слідуючи принципам розвитку демократичної держави, однак потребує від суспільства відповідного рівня інституційної та суспільної зрілості. Разом із тим, аргументовано можливість і потребу використовувати обидва способи регламентації у сферах, де це виправдано, а також для виправлення правових чи управлінських колізій. Ідентифіковано та описано проблему неможливості формування забороняючих норм іншими рамковими нормами як результату негативного регулювання, аргументовано необхідність надання забороняючим нормам чіткого позитивного характеру.

Ключові слова: публічно-приватні відносини, правове регулювання, позитивна регламентація, негативна регламентація, інноваційне управління, дерегуляція, механізм регулювання.

A. S. KARAPINKA

Postgraduate Student at the Department of Theoretical and Applied Economics

Lviv Polytechnic National University

ORCID: 0009-0009-4968-3037

NEGATIVE REGULATION WITHIN THE STRUCTURE OF REAGULATORY MECHANISM OF PUBLIC-PRIVATE RELATIONS

This article examines one of the most critical components of the regulatory mechanism for public-private relations – legal regulation – with a primary focus on its negative form. Negative regulation is defined as the process of ordering social relations by establishing rules in the form of prohibitions. The author substantiates the thesis that this method serves as a characteristic tool for regulating a wide range of public relations spheres that possess the potential for integrating private practices and principles as they transition toward a public-private interaction model. The study identifies indicators of resource and time inefficiency and questions the quality of legal regulation performed in the traditional positive manner when it lacks sufficient support. These indicators suggest the need for an alternative approach to building social connections, characterized by empowering participants with the freedom to act in any manner of their choice within the boundaries defined by prohibitions. As a specific act of formalizing the regulator's will into legal norms, negative regulation aligns more closely with the principles of a democratic state compared to positive regulation, though it requires a requisite level of institutional and social maturity. Furthermore, the article argues for the possibility and necessity of employing both regulatory methods where justified, as well as for resolving legal or administrative conflicts. Finally, the study identifies and describes the problem of the inability of framework norms to form prohibitive norms as a result of negative regulation, advocating for the necessity of imbuing prohibitive norms with a clear positive character.

Key words: public-private relations, legal regulation, positive regulation, negative regulation, innovative management, deregulation, regulatory mechanism.



Постановка проблеми

У сучасному світі, в умовах прискорення інноваційного розвитку, проблема пошуку гнучких та економічно ефективних інструментів для реалізації суспільних інтересів займає значне місце в якості об'єкту, на який спрямовані зусилля науковців з різних галузей, що в тій чи іншій мірі взаємодіють з наукою та практикою публічного управління. В контексті кардинальних змін, через які змушений проходити український публічний сектор під впливом важкої економічної ситуації, спричиненої зовнішньою агресією, важливим завданням є обрання оптимальних моделей адаптації до цього нестабільного і непередбачуваного середовища. Одним із питань, що постають найбільш гостро, є забезпечення належної якості правового регулювання в процесі реформування економіки, моделі публічного управління та побудови сучасних інституцій, в умовах обмежених ресурсів та людського капіталу. Виявлення та обґрунтування можливостей до застосування негативного регламентування як більш “дешевого” аналогу традиційного позитивного, може стати відповіддю на таке питання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Традиційно, наукова література, зокрема вітчизняна, надає великої уваги правовому регулюванню (Скакун О. Ф., Козюбра М. І. та інші), часто не опрацьовуючи детально саме негативний його компонент. Дана прогалина зараз успішно заповнюється західними науковцями, які активно працюють з темою негативних проявів регулювання (M. Höpner, S. K. Schmidt, D. Seikel, R. Borgert, Hirschl R. та інші).

Формулювання мети дослідження

Виявлення закономірностей та переваг у застосуванні методу негативного регламентування як елементу механізму управлінського впливу на суспільні відносини та їх упорядкування у публічно-приватній площині. Розкриття значення цього інструменту для економічного зростання та збільшення ефективності використання ресурсів у процесі врядування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Публічно-приватні відносини, як явище взаємної інтеграції практик та форматів в умовах дуалістичного поділу всіх взаємодій у межах суспільства та держави на публічні і приватні, ґрунтуються не лише на своїй особливій природі. Їх значення та важливість проявляється, зокрема, і у прикладному вимірі – у тому, яким чином публічно-приватні відносини впливають на суспільство та управління ним, а також у тому, яким чином ці відносини формалізуються в рішеннях та актах нормативного характеру. Виокремлюючи одну з базових ознак таких відносин – диспозитивність, яка проявляється у відсутності владного впливу одного учасника на іншого, можна констатувати існування певного конфлікту між традиційним механізмом врегулювання відносин та їх природою.

Так, основним компонентом адміністративного механізму регулювання публічно-приватних відносин є правове регулювання – організаційна діяльність уповноваженого суб'єкта, що полягає у встановленні обов'язкових до виконання правил. Цей компонент, володіючи нормативною природою, є невід'ємною частиною регуляторної функції публічного управління [1, с. 25]. Як випливає із самої суті творення правил, вони проявляються або у формі повноважень (прав та обов'язків), або у формі заборон. Шведун В. О. вважає, що дозвіл реалізується за допомогою відповідних норм права; припис і заборона – найбільш відомі і часто вживані на практиці, як види державно-правового регулювання – включені в механізм застосування заходів адміністративного примусу [2, с. 228]. В науці зустрічається також поділ методів регулювання на імперативний (базується на принципі субординації, головним інструментарієм якого визначається встановлення заборон і зобов'язань) та диспозитивний (в основу реалізації якого покладено принцип юридичної рівності учасників правовідносин та узгодженні (координації) їх волі (реалізується за допомогою таких засобів регулювання, як дозволи, договори) [3, с. 27]. Для цілей даного аналізу такий поділ, зберігаючи фактичну релевантність, вказує на більшу спорідненість імперативних зобов'язань з диспозитивними правами, ніж з імперативними заборонами. Це стається тому, що і зобов'язання (або припис) і право (або дозвіл) обмежені тими проявами, які чітко передбачені регулятором і на упорядкування яких він має відповідну волю та інструменти. У той час як відносини, окреслені заборонами, проявляються у безлічі форм і сутностей, а регулятору залишається лише ідентифікувати та виокремити ті з них, що не відповідають його інтересам і волі.

При встановленні повноважень суб'єкт регулювання окреслює середовище, в якому проводиться відповідна діяльність, виокремлює конкретні відносини, які належить врегулювати, та створює особливу юридичну матерію – позитивне право. По суті, йдеться про встановлення правила у формі: «слід вчиняти так». Таке позитивне регулювання, або його безпосередня формалізація у нормах права (регламентування) є складним процесом, що передбачає ідентифікацію цільових відносин, розробку численних сценаріїв їх ходу і розвитку, пошук загроз, потенційних зловживань правами, дискримінацій та багато іншого. Слід зазначити, що якісне виконання такого завдання потребує глибокого аналізу та знання сфери регулювання, детального вивчення версій та пошуку оптимального правила, яке відповідатиме меті регламентування. Безперечно, саме такий підхід найкраще проявляється у відносинах, що потребують чітких ролей їх учасників (наприклад, дозвільні процедури), але він також найбільш чутливий до помилок або низького рівня кваліфікації регулятора, адже вибір неправильних форм та методів регулювання може зруйнувати відносини, або ж створити простір для зловживань.

Виходячи з такої характеристики позитивного регламентування, одразу стає помітною невідповідність такого регулювання духу публічно-приватних відносин як явища, а також концепції публічно-приватної взаємодії, як основи сучасної структури суспільних зв'язків. Позитивне регулювання побудоване на беззаперечному авторитеті та презумпції коректності рішень регулятора, пов'язуючи учасників відносин у конкретний спосіб з відповідним набором прав та обов'язків. Воно може бути організоване на двох рівнях:

- 1) встановлення чіткого детермінізму «якщо – то», коли на кожну умову передбачено відповідну реакцію;
- 2) встановлення гнучкої рамки «якщо – то, або то», коли на кожну умову передбачено перелік або обмежений обсяг реакцій.

Незважаючи на очевидну перевагу другого рівня, який тяжіє до приватної сфери в умовах сучасної моделі врядування та побудови ринкових відносин, можливості та потенціал учасників таких відносин усе одно обмежений волею та інтересами публічного суб'єкта – регулятора. Приводячи аналогію, таке регулювання полягає у зафарбовуванні кола відносин певним кольором, на розсуд регулятора. Учасникам відносин пропонується прийняти цей вибір і діяти відповідно до нього. Слід зазначити, що позитивна норма, визначаючи сценарій поведінки учасників суспільних відносин, фактично містить у собі тіньову заборону на поведінку, що відхиляється від такого сценарію [4, с. 131].

Звичайно, такий підхід означає прогнозованість та контрольованість, однак, він усуває усі позитивні властивості, що випливають з волі учасників, їх індивідуальних якостей, особливих підходів то побудови взаємодій з іншими учасниками, та інші переваги приватних відносин. Таким чином, у цьому і полягає конфлікт позитивного регламентування з теорією публічно-приватних відносин, яка аргументує перевагу приватних форм взаємодії над зарегульованими і негнучкими структурами відносин. Зокрема, ця затримка в реагуванні проявляється в економічній площині, коли позитивному регулюванню протиставляється самоорганізація, яка має, як правило, вирішальне значення для гнучкого та оперативного реагування економіки на мінливі споживчі переваги, смаки та потреби [5, с. 32]. Відповідно, за своєю природою позитивне регламентування, слідує конституційному принципу, є найбільш придатним до врегулювання саме публічних відносин, де потребується чітке визначення компетенцій державних органів та органів місцевого самоврядування.

На противагу цьому, негативна регламентація є практичним втіленням загальнодозволеного принципу – основи вільного ринку, демократичного врядування, приватних та публічно-приватних відносин. Схожу думку висловлює Корнієнко В. В., визнаючи пріоритет такого принципу в демократичних державах [6, с. 30]. Такий спосіб регулювання полягає не у встановленні можливих варіантів реагування на умови, і, тим більше, конкретних реакцій на умови, а в окресленні загальної сфери відносин та виокремленні небажаних варіантів поведінки суб'єктів, зв'язків між ними та обмеженні їх статусу відповідно до інтересів суспільства та держави. Усі ж інші елементи суспільних відносин передаються в розпорядження їх учасникам. Цей метод регулювання життя суспільства використовується з найдавніших часів, підтвердженням цьому можуть служити релігійні тексти як найдавніші джерела традиційного права, зокрема, біблійний текст про заборонений плід як ілюстрація свободи вибору в умовах існування об'єктивних заборон. Повертаючись до аналогії, регулятор не зафарбовує коло відносин, а лише обводить його контуром, дозволяючи їх учасникам самостійно заповнювати це коло у будь-який зручний спосіб, бажаний колір, у будь-якій послідовності. Єдина умова – не виходити за межі контуру, який є набором рестрикцій, сукупністю недопустимих (на думку регулятора) зв'язків та варіантів поведінки учасників.

Очевидним недоліком цього способу регламентації є складність для регулятора у визначенні не лише меж допустимої поведінки учасників суспільних відносин, але й способів забезпечення їх дотримання. Залишивши сферу відносин на саморегулювання з відповідними обмеженнями, регулятор наділяє учасників взаємодій можливістю вільно розпоряджатися усіма їх елементами. Це дозволяє учасникам цих відносин обирати найкращі шляхи для задоволення своїх інтересів та формувати будь-які незаборонені зв'язки, що, у деяких випадках, може спровокувати появу у таких учасників переконання про вседозволеність і відсутність будь-яких лімітів. Саме тому негативне регламентування має супроводжуватися створенням інфраструктури забезпечення дотримання встановлених обмежень.

Результатом такого способу регулювання не є формування замкнених хаотичних систем з відсутністю правил, неможливістю прогнозування та реагування з боку регулятора. Навпаки, такий спосіб можливий лише в тих системах зв'язків, які мають відповідний потенціал до саморегулювання: традиції побудови взаємодій між учасниками, довіра до них, прозорість їх інтересів, а також розуміння того, що позитивне регулювання стримує розвиток сфери, адже є негнучким. Звичайно, позитивне регламентування є більш точним інструментом перенесення у цільову сферу волі регулятора, який, однак, потребує постійного моніторингу змін та недоліків врегульованих у такий спосіб відносин. Для регулятора це означає значні витрати часу та ресурсів, яких у нього, у зв'язку з числом існуючих відносин у суспільстві, немає. Це призводить до того, що частина сфер залишають недорегульованими, або ж регулюються застарілим позитивним правом, що, безумовно, стримує їх модернізацію та завдає державі і суспільству збитків.

Гнучкість негативного регулювання полягає у неспівмірно менших витратах часу та ресурсів на відстеження некоректної роботи системи обмежень та заборон, зловживань учасників своїми правами або інших порушень балансу у відносинах регламентованих сфер, а також у меншій вартості нормотворчості [7, с. 86]. Регуляторна ж діяльність полягає у реагуванні на окремі випадки, що суперечать інтересам держави та суспільства, а не у стеженні за усіма відносинами, що належать до такої сфери інтересів. Разом із тим, слід розуміти, що в будь-якій саморегульованій сфері можуть ставатися збої, які не можуть бути усунені без прямого втручання регулятора. Найбільш яскраво вони проявляються у контексті правових колізій, коли новий регуляторний акт вступає у суперечність з іншими чинними актами. Яким би широким не було коло допустимої поведінки у межах врегульованих такими актами сфер, існування та одночасна чинність конфліктуючих між собою правил здатне привести цю сферу до хаосу, який може бути вирішений двома способами:

1) новим регулюванням з метою усунення колізії, яке однак, може створюватися дуже тривалий час, залишаючи систему з внутрішнім конфліктом.

2) інтервенцією позитивного регулювання, спрямованою на внесення у структуру проблемних відносин чітких правил, що визначають поведінку учасників в умовах колізії. В Україні, як і у більшості інших держав світу, цю функцію виконує, зазвичай, судова гілка влади, яка творить прецедентну правову матерію, що у одних правових системах є регламентуванням як таким, а у інших – тимчасовим заходом до моменту врегулювання колізій у законний спосіб. На думку Юхимюк О. М., у сучасних умовах провідна роль у подоланні колізії належить легальному тлумаченню, що здійснюється вищими судовими інстанціями, і перш за все Конституційним Судом України [8].

Як випливає з цих тез, негативне регламентування рідко може існувати без супроводу позитивного. Більше того, на думку Ran Hirschl, негативні права, або як зазначає автор, “права на невтручання” часто не можуть існувати без позитивних норм, що забезпечують їх. Як приклад, він наводить недоторканність права власності (негативне право), яке може бути забезпечене лише відповідною системою реєстрації та правоохоронної діяльності (врегульованої позитивним правом) [9, с. 1072]. Переваги шляху встановлення заборон для створення умов, коли учасники мають широкий простір для свого розвитку, можуть бути доповнені окремими правилами, що визначають статус окремих компонентів відносин, якщо таке поєднання вважатиметься найбільш ефективним для підтримки балансу між реактивністю та керованістю системи. Утім, запровадження практики негативного регламентування має спиратися на ряд факторів – передумов, які дозволяють розкрити переваги такого методу та роблять його застосування виправданим. Серед них варто виділити такі:

1. Високий рівень правової культури суспільства, коли учасники суспільних відносин усвідомлюють свою відповідальність за власні дії, розуміють пов’язаність прав та обов’язків та керуються у своїх діях законними інтересами;

2. Функціонування інститутів громадянського суспільства як системних запобіжників у саморегульованій структурі, що спроможні здійснювати неофіційний суспільний регуляторний вплив, авторитет якого не піддається сумніву учасниками відносин, які бажають зберегти своє місце у якості учасників такого суспільства, дотримуючись його принципів та законів, зокрема, моральних;

3. Сформовані базові принципи правової держави та вільної економіки, адже лише у середовищі, де сформовано сильну приватну сферу, що демонструє високий рівень розвитку своїх інститутів, можна здійснювати делегування традиційно публічних справ у площину публічно-приватної взаємодії;

4. Запроваджено сучасну модель публічного врядування на основі принципів верховенства права, гласності та професіоналізму. Утворення саморегульованих систем можливе лише в умовах, коли держава управляється професійними носіями владних повноважень, які здатні відмовлятися від своєї влади на користь інтересів суспільства, вступаючи у публічно-приватні відносини.

Такий перелік передумов свідчить про те, що негативне регламентування, хоч і менш вимогливе, у порівнянні з позитивним, до рівня ресурсного забезпечення та компетентності регулятора, усе ж комплексно залежить від середовища, в якому застосовується. Непідготовлені концептуально та ідеологічно суспільства, де публічні інституції глибоко інтегровані в економіку і приватна сфера перебуває в зародковому, або ж пригніченому становищі, не можуть собі дозволити побудову правової рамки публічного управління у цей спосіб. В таких спільнотах «надлишкова» свобода суб’єктів взаємодій, зокрема, в політичній та економічній сфері, стикатиметься з протидією інституційної системи та спотворюватиметься, а конфлікти між учасниками відносин не будуть вирішуватися за практикою приватної сфери, покладаючись на авторитет публічної, відкидаючи основи та саму ідею негативного регламентування. У такому випадку суспільство, звичайно, мало б покладатися на традиційний та безпечніший, проте повільніший з точки зору розвитку, інструмент.

Характерною помилкою в тлумаченні природи негативного регламентування є судження про те, що воно є тотожним до відсутності регулювання як такого. На перший погляд, у таких станах і справді є багато схожих рис: широка свобода учасників відносин, неврегульованість моделей побудови зв’язків, мінімальна або відсутня участь публічних учасників у системі тощо. Однак відсутність регулювання, або правовий вакуум, означає або

неготовність регулятора використовувати позитивний чи негативний способи через відсутність прийнятного рішення, або ж свідоме чи несвідоме ігнорування існування неврегульованих відносин. Прикладом першого може слугувати відсутність будь-якого регламентування обігу криптовалют в Україні, обмежене спорадичними спробами виокремити та формалізувати окремі компоненти цього інноваційного явища; прикладом другого може бути нещодавнє ігнорування українським законодавцем букмекерської та ігрової сфери, яка довгий час залишалася фрагментарно регульованою та хаотичною. Таким чином, вирішальною ознакою, що дає нам можливість констатувати існування правового вакууму, є відсутність цілісного концепту врегулювання – візії нормотворця. На противагу цьому, негативна регламентація є інструментом втілення цієї візії у нормах права та управлінських рішеннях.

В контексті співставлення публічно-приватних відносин з явищем негативного регламентування також прослідковується подвійна природа зв'язку. З одного боку, публічно-приватні відносини є характерним результатом негативного регламентування, адже саме шляхом відмови від амбіцій щодо спроможності та можливості забезпечення належної якості здійснення позитивного регламентування регулятор стає доступним до формування за його участю публічно-приватної взаємодії. В такому разі дерегульована (позбавлена надлишкового позитивного регулювання) сфера стає сприятливим середовищем для утворення інноваційних та ефективних взаємодій між приватними та публічними учасниками. По-друге, публічно-приватне середовище, характеризуючись високим рівнем залучення приватної сфери у реалізації публічних інтересів, супроводжується імплементацією приватних практик в інструментальну базу регулятора, чим мотивує його використовувати найбільш доступні та економічно ефективні з них. Зважаючи на традиційну інерційність публічної сфери у більшості держав (за винятком, хіба що, держав Скандинавії), саме приватні методи та інструменти є оптимальним вибором для використання у регламентації, що в той чи інший спосіб підводить регулятора до використання її негативної форми.

Характеризуючи переваги негативної регламентації як базової частини механізму регулювання публічно-приватних відносин, не можна ігнорувати особливості такої форми при вирішенні питання змісту заборон. Як вже було зазначено, жодна негативно-правова регуляторна рамка не є життєздатною без належної інфраструктури забезпечення – обов'язкового компоненту захисту її цілісності та непорушності. Звичайно, ці заборони є окремим і значним за своїм обсягом комплексом відносин. Визначаючи у ході негативної регламентації перелік недозволених дій та зв'язків, регулятор обов'язково прийде до висновку, що ось ці положення про недозволене мають бути по своїй суті конкретними та зрозумілими для учасників відносин, і не можуть бути рамковими, як відносини, які вони обмежують. Слід поглянути на це явище з точки зору двох прикладів:

1. Регулятор встановлює в якості обмеження рамкової структури першого рівня (власне, відносини, що врегульовуються) конкретні та повноцінні прояви відносин. У якості прикладу можна взяти навмисно спрощений порядок поведінки з державною таємницею. Тоді вигляд негативної регламентації відносин поведінки з інформацією з потребою захисту державної таємниці міг би бути таким: «Державу таємницю розголошувати заборонено. Державною таємницею є:...». В такому вигляді забороняюча норма є конкретною і, за своєю природою, позитивною, не допускаючи свободи тлумачень.

2. Регулятор встановлює в якості обмеження рамкової структури першого рівня не конкретні недозволені прояви відносин, а рамкову структуру другого рівня. Логічно, що в такому вигляді коло не замикатиметься, адже бажання регулятора передбачити недозволені відносини зіткнулося з його неспроможністю ці відносини окреслити. Відповідно, дана незавершена регуляторна структура відносин має потенціал до безмежного накладання нових рамок нижчих рівнів. Можна припустити, що нормотворець вирішив здійснити негативну регламентацію цих відносин, застосувавши не вказане вище формулювання, а рамкову заборону: «Таємницю розголошувати заборонено». В результаті цього створюється простір для вільного тлумачення учасниками відносин того, що слід вважати таємницею: державну, службову, комерційну, банківську, особисту чи іншу таємницю? Відповідно, регулятор допустив існування зайвого неврегульованого простору, що суперечить його задуму з влаштування структури відносин, де захисту підлягає лише державна таємниця. Залежно від складності заборони, можна припустити можливість існування значного числа таких рівнів, що робить таке регулювання недієздатним і таким, що покладається на індивідуальні рішення, а не нормативні приписи.

Вказаний приклад дозволяє зробити висновок, що правильно оформлене негативне регламентування повинне покладатися на сформульовану у позитивний спосіб забороняючу норму. Отже, цільове коло відносин не зафарбовується регулятором (як того вимагає негативна регламентація), а от його контур має бути зафарбований (як того вимагає позитивна регламентація). На прикладі галузі кримінального права (як частини інфраструктури забезпечення дотримання заборон) цю закономірність вдало демонструє Попович О. В., що описує позитивне регулювання як процес визначення того, які суспільно небезпечні діяння є кримінальними правопорушеннями, встановлення вичерпного переліку кримінально-правових заборон і, таким чином, застосування загальнодозвільного типу регулювання [10, с. 209]. Будь-який інший спосіб формулювання заборони призводитиме лише до мультиплікації багатозначностей, що спричинятиме навантаження на судову гілку влади, яка змушена буде їх тлумачити та індивідуально врегульовувати.

Висновки

На підставі описаних властивостей та особливостей негативного регламентування слід констатувати, що даний спосіб упорядкування суспільних відносин є ефективним проявом сучасної моделі публічного врядування, характерним для зрілих демократичних суспільств. Він є оптимальним для дерегуляції публічної сфери з її трансформацією у публічно-приватну, стаючи, у подальшому, основним інструментом діяльності регулятора у цій сфері. Забезпечуючи найшвидший темп адаптації до динамічних середовищ та впливу інновацій, метод негативного регламентування забезпечує прийнятну якість впорядкування в умовах обмежених ресурсів.

Разом із тим, у статичних і стабільних системах відносин позитивне регламентування здатне точніше виявити мотивацію та наміри регулятора, за умови його достатньої компетентності та ресурсного забезпечення. Також, як зазначалося, позитивне регламентування є основним у процесі формування заборон, запобігаючи їх вільним інтерпретаціям учасниками відносин.

Список використаної літератури

1. Бородин І. Л. Я. Функції публічного управління. *Юридичний вісник. Повітряне і космічне право*. 2014. № 3. С. 24–29.
2. Шведун В. О. Політико-правовий механізм державного управління безпечним повоєнним соціально-економічним розвитком регіонів. *Інвестиції: практика та досвід*. 2025. № 4. С. 225–228. DOI: 10.32702/2306-6814.2025.4.225
3. Легеца Ю. Методи публічного управління: адміністративно-правовий аспект. *Law. State. Technology*. 2021. № 2. С. 25–30.
4. Кучерявенко М. Правова заборона: податковий аспект. *Право України*. 2023. № 7. С. 128–140.
5. Шевченко Б. О. Проблема оптимального поєднання державного регулювання та ринкової самоорганізації у національній моделі економіки. 2022. С. 29–33. (Примітка: у джерелі відсутня назва видання/збірника).
6. Корнієнко В. В. Дозвіл і заборона в праві: підтримання балансу. *Вісник Харківського національного університету внутрішніх справ*. 2011. № 3. С. 28–33.
7. Borgert R. Negative Legislation. *Federalist Soc'y Rev*. 2021. Vol. 22. P. 86–95.
8. Юхимюк О. М. Тлумачення норм права як спосіб подолання правових колізій : дис.... канд. юрид. наук : 12.00.01. Донецьк : Донецький юридичний інститут МВС України, 2011. 195 с.
9. Hirschl R. "Negative" Rights vs. "Positive" Entitlements: A Comparative Study of Judicial Interpretations of Rights in an Emerging Neo-Liberal Economic Order. *Human Rights Quarterly*. 2000. Vol. 22, no. 4. P. 1060–1083. DOI: .
10. Попович О. В. Проблема типу кримінально-правового регулювання. *Наукові читання пам'яті Ганса Гросса : зб. тез міжнар. наук.-практ. конф. / за ред. В. А. Вдовічен*. 2021. С. 206–210.

References

1. Borodin, I. L. Ya. (2014). Functions of public administration. *Juridical Journal: Air and Space Law*, (3), 24–29.
2. Shvedun, V. O. (2025). Political and legal mechanism of state management of secure post-war socio-economic development of regions. *Investytsiyi: Praktyka ta Dosvid*, (4), 225–228.
3. Legeza, Yu. (2021). Methods of public administration: Administrative and legal aspect. *Law. State. Technology*, (2), 25–30.
4. Kucheriavenko, M. (2023). Legal prohibition: Tax aspect. *Law of Ukraine*, (7), 128–140.
5. Shevchenko, B. O. (2022). The problem of optimal combination of state regulation and market self-organization in the national model of economy. *Scientific Collection*, 29–33.
6. Kornienko, V. V. (2011). Permission and prohibition in law: Maintaining a balance. *Bulletin of Kharkiv National University of Internal Affairs*, (3), 28–33.
7. Borgert, R. (2021). Negative legislation. *Federalist Society Review*, 22, 86–95.
8. Yukhymyuk, O. M. (2011). *Interpretation of legal norms as a way to overcome legal conflicts* [Doctoral dissertation, Donetsk Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine].
9. Hirschl, R. (2000). "Negative" rights vs. «positive» entitlements: A comparative study of judicial interpretations of rights in an emerging neo-liberal economic order. *Human Rights Quarterly*, 22(4), 1060–1083.
10. Popovych, O. V. (2021). The problem of the type of criminal law regulation. In V. A. Vdovichen (Ed.), *Scientific readings in memory of Hans Gross: Collection of abstracts of the international scientific and practical conference* (pp. 206–210).

Дата першого надходження статті до видання: 13.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

НОТАТКИ

ВІСНИК

Херсонського національного технічного університету

Відповідальний за випуск	головний редактор Проценко В. О. д.т.н., професор, професор кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Комп'ютерна верстка	Клименко Т. О.

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа: Рішення Національної ради України
з питань телебачення і радіомовлення № 1541 від 09.05.2024 року. Ідентифікатор медіа: R30-04565.

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Херсонський національний технічний університет
(вул. Інститутська, буд. 11, м. Хмельницький, 29016, olena.chepelyuk@kntu.net.ua, тел. +38 (0382) 77-35-65).

Періодичність виходу: 4 рази на рік.

Дата розміщення онлайн – 30.04.2026 р. Дата друку – 05.05.2026 р.
Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman. Папір офсет. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 51,15. Замов. № 0426/326. Наклад 100 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.