

ISSN 2078-4481

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК

ХЕРСОНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

4(95)

Частина 2

Рекомендовано до друку Вченою радою
Херсонського національного технічного університету
(протокол № 6 від 11.12.2025 року)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України
категорії «Б» зі спеціальностей: С1, 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»
2025

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**

4(95)

Part 2

Recommended for publication by the Academic Council
of Kherson National Technical University
(Minutes № 6 on 11th December 2025)

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”
2025

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
Sidelnykova 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

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

І. О. Астіоненко, П. Й. Гучек, О. М. Дудченко, О. І. Литвиненко. Апроксимації на скінченному елементі у формі правильного n-кутника.....	9
М. В. Бебех. Перспективи використання AI для персоналізації навчання з 3D-моделювання та друку в STEM-освіті.....	16
Р. М. Галаган, А. А. Сакута, А. С. Момот, О. В. Муравйов, О. А. Повшенко. Перспективи розвитку чотириногих роботів з функцією голосового управління.....	23
Ю. Л. Гунько, О. О. Базиль, М. І. Барбаш. Інформаційні технології у створенні цифрових близнюків для інженерних систем.....	35
В. І. Дроменко, В. І. Чупринка. Застосування методів математичного моделювання для підвищення точності тривимірного проектування рукавичок.....	43
О. Г. Зінов'єва, М. М. Горонескуль. Підтримка прийняття рішень у розробленні програмного забезпечення за допомогою Agile-інструментів.....	51
А. В. Казначеева, К. П. Сторчак, А. Р. Гаврилюк. Аналіз та прогнозування навантаження в мережах інтернету речей.....	57
В. І. Кліменко, І. О. Боярчук, М. О. Молчанова, О. В. Собко, О. В. Мазурець. Проектування архітектури програмного забезпечення на основі об'єктно-орієнтованого підходу для реалізації алгоритму нейромережевого виявлення етнічної ворожнечі у повідомленнях.....	66
О. М. Козачко, А. В. Сигута, А. В. Войткік. Математичне моделювання процесів машинного навчання в завданнях розпізнавання зображень.....	76
О. М. Коробкова. Оптимізація системи митного огляду за допомогою симуляційного моделювання з урахуванням обмежених ресурсів.....	85
В. А. Крісілов, О. В. Іщенко. Методи візуального, текстового та інтернет-аналізу даних у сучасних системах data mining.....	93
В. О. Kuzikov, O. V. Vlasenko, O. V. Shutylieva, O. A. Shovkoplyas, S. R. Shovkopliyas, P. O. Tytov. Multi-model approach to synthetic data generation for semantic similarity assessment of web interface text labels.....	99
Ю. В. Максим'юк, К. В. Дмитрієв, М. М. Черненко. Використання цифрових двійників для підвищення ефективності управління виробничими процесами в українській промисловості.....	106
О. А. Мельникова, С. В. Грасмік, О. Є. Петренко, І. В. Олешко. Створення алгоритмів приведення по фіксованим модулям для криптосистем, що використовують арифметику розширених двійкових полів.....	112
О. А. Мельникова, С. В. Грасмік. Становлення та розвиток квантово-стійких криптографічних технологій у Німеччині.....	119
М. В. Новожилова, О. І. Чуб, О. Б. Костенко. Побудова та реалізація багатовимірної задачі розподілу ресурсів з урахуванням часового вікна.....	125
А. О. Онищенко, Б. П. Бочаров, О. Б. Костенко. Гібридна модель MCDM для інтелектуального вдосконалення пошукової оптимізації.....	132
О. С. Орехов, Т. А. Фаріонова. П'ятифакторна математична модель для обробки інформації з метрик коду Java-застосунків для оцінювання їх розміру.....	139
Ф. Ф. Сайберт, Ю. Ю. Білак. Адаптивна інформаційна система спектрального моделювання на базі фізично-інформованого Монте-Карло.....	147
В. С. Сичков. Порівняння алгоритмів визначення частотних складових сигналу в мобільних системах.....	164
Є. О. Титарчук, М. М. Мусяйовська, С. В. Фадеїчев. Моделювання ризиків у кібербезпеці критичних інфраструктур на основі ML.....	170
Д. Є. Фролов. Метод адаптивного резервування ресурсів у багаторівневих структурах складних інформаційних систем.....	177
С. М. Шевченко, Ю. Д. Жданова, О. В. Кочетков. Багатокритеріальна оптимізація для вибору найкращої конфігурації комп'ютерних систем.....	189

УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

Д. Т. Бікулов, О. С. Верітова. Історія менеджменту у контексті розбудови інфраструктури міжнародного бізнесу.....	199
В. В. Євтушенко, О. В. Чепелюк. Міжнародна торгівля продукцією легкої промисловості: стан та перспективи.....	204
О. В. Кокорєва, А. О. Осадча. Позитивний вплив ESG-рейтингів на зниження вартості капіталу промислових підприємств.....	208
О. В. Кривда, К. М. Доник. Резерви удосконалення кадрової політики українських підприємств в умовах воєнного стану.....	214
О. В. Писарчук. Обліково-аналітичне забезпечення державно-приватного партнерства у фінансуванні високвитратних спеціальностей.....	220
Л. П. Сідельникова, О. М. Посаднєва. Архітектоніка фінансового потенціалу держави в умовах сучасних викликів безпекового середовища.....	228
Ю. О. Соколова, Н. М. Павлішина. Застосування AI-інструментів у системі маркетингових комунікацій B2B-ринку.....	236

ПУБЛІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

В. О. Бескоровайний. Світові підходи до визначення корупції, її складових та боротьби з нею	243
С. С. Динчев. Досвід уряду Хорватії у реінтеграції тимчасово окупованих територій.....	250
О. М. Оліїник. Conceptual model of state digital traceability in the food industry in the context of electronic and quick commerce development Ukraine.....	255
М. М. Паланиця. Інноваційні підходи до співпраці влади та бізнесу у формуванні стратегій сталого місцевого розвитку	265
М. М. Стецюк, Р. М. Захарченко. Роль-орієнтоване multi-agent reinforcement learning для автономного розподілу задач у гетерогенному рої безпілотних літальних апаратів.....	271

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES

I. O. Astionenko, P. Y. Guchek, O. M. Dudchenko, O. I. Lytvynenko. Approximations on a finite element in the form of a regular n-gon..... 9

M. V. Bebekh. Prospects of using AI to personalize teaching in 3D modeling and printing in STEM education.....16

R. M. Galagan, A. A. Sakuta, A. S. Momot, O. V. Muraviov, O. A. Povshenko. Prospects for the development of quadruped robots with voice control functionality..... 23

Yu. L. Hunko, O. O. Bazyl, M. I. Barbash. Information technologies in the development of digital twins for engineering systems.....35

V. I. Dromenko, V. I. Chuprynka. Application of mathematical modelling methods to improve the accuracy of three-dimensional glove design.....43

O. G. Zinovieva, M. N. Goronescul. Supporting decision making in software development using Agile tools.....51

A. V. Kaznaheieva, K. P. Storchak, A. R. Havryliuk. Load analysis and forecasting in internet of things networks.....57

V. I. Klimenko, I. O. Boiarchuk, M. O. Molchanova, O. V. Sobko, O. V. Mazurets. Designing of software architecture based on object-oriented approach for implementation of neural network algorithm for detecting ethnic hate in messages.....66

O. M. Kozachko, A. V. Syguta, A. V. Voitik. Mathematical modeling of machine learning processes in image recognition tasks.....76

O. M. Korobkova. Optimization of the customs inspection system using simulation modeling under resource constraints..... 85

V. A. Krisilov, O. V. Ishchenko. Methods of visual, textual, and web data analysis in modern data mining systems.....93

B. O. Kuzikov, O. V. Vlasenko, O. V. Shutylieva, O. A. Shovkoplyas, S. R. Shovkoplias, P. O. Tytov. Multi-model approach to synthetic data generation for semantic similarity assessment of web interface text labels.....99

Yu. V. Maksymiuk, K. V. Dmytriiev, M. M. Chernenko. Using digital twins to improve the efficiency of production process management in Ukrainian industry..... 106

O. A. Melnykova, S. V. Hrasnik, O. Ye. Petrenko, I. V. Oleshko. Design of fixed moduli modular reduction algorithms for cryptosystems that use extended binary field arithmetic.....112

O. A. Melnykova, S. V. Hrasnik. Formation and development of quantum-resistant cryptographic technologies in Germany.....119

M. V. Novozhylova, O. I. Chub, O. B. Kostenko. Modelling and realizing a multidimensional resource allocation problem with time window constraints.....125

A. O. Onyshchenko, B. P. Bocharov, O. B. Kostenko. A hybrid MCDM model for the intelligent enhancement of search engine optimization..... 132

O. S. Oriekhov, T. A. Farionova. Five-factor mathematical model for processing information from code metrics of Java applications for estimating their size.....139

F. F. Saibert, Yu. Yu. Bilak. Adaptive information system for spectral modeling based on physically-informed Monte Carlo.....147

V. S. Sychkov. Comparison of algorithms for determining the frequency components of a signal in mobile systems.....164

Ye. O. Tytarchuk, M. M. Musiiovska, S. V. Fadeichev. Machine learning-based risk modeling in critical infrastructure cybersecurity.....170

D. Ye. Frolov. A method for adaptive resource reservation in multilevel structures of complex information systems.....177

S. M. Shevchenko, Yu. D. Zhdanova, O. V. Kochetkov. Multi-criteria optimization for selecting the best configuration of computer systems.....189

MANAGEMENT AND ADMINISTRATION

O. S. Veritova. History of management in the context of the international business reconstruction.....	199
V. V. Yevtushenko, O. V. Chepelyuk. International trade in light industry products: current status and prospects.....	204
O. V. Kokorieva, A. O. Osadcha. Influence of ESG ratings on the cost of capital of industrial enterprises.....	208
O. V. Kryvda, K. M. Donyk. Reserves for the improvement of personnel policy of Ukrainian enterprises under the conditions of marital state.....	214
O. V. Pysarchuk. Accounting and analytical support for public-private partnerships in financing high-cost specialities.....	220
L. P. Sidelnikova. Architectonics of the state's financial potential under modern security challenges.....	228
Yu. O. Sokolova, N. M. Pavlishyna. Application of AI tools in the B2B marketing communication system.....	236

PUBLIC MANAGEMENT AND ADMINISTRATION

V. O. Beskorovainyi. Global approaches to defining corruption, its components, and combating it.....	243
S. S. Dynchev. Experience of the Croatian government in the reintegration of temporarily occupied territories.....	250
O. M. Oliinyk. Conceptual model of state digital traceability in the food industry in the context of electronic and quick commerce development Ukraine.....	255
M. M. Palanytsia. Innovative approaches to cooperation between authorities and business in forming sustainable local development strategies.....	265
M. M. Stetsiuk, R. M. Zakharchenko. Role-oriented multi-agent reinforcement learning for autonomous task allocation in a heterogeneous UAV swarm.....	271

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 519.6

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.2.1>

І. О. АСТІОНЕНКО

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри інформатики і комп'ютерних наук
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-5831-6353

П. Й. ГУЧЕК

доктор технічних наук,
завідувач кафедри інформаційних технологій
та фізико-математичних дисциплін
Херсонський навчально-науковий інститут
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова,
професор Університету VIZJA, Варшава, Польща
ORCID: 0000-0002-6110-6816

О. М. ДУДЧЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інформаційних технологій
та фізико-математичних дисциплін,
заступник директора
Херсонський навчально-науковий інститут
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
ORCID: 0000-0002-7724-0892

О. І. ЛИТВИНЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інформаційних технологій
та фізико-математичних дисциплін
Херсонський навчально-науковий інститут
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
ORCID: 0000-0001-9890-6959

АПРОКСИМАЦІЇ НА СКІНЧЕННОМУ ЕЛЕМЕНТІ У ФОРМІ ПРАВИЛЬНОГО N-КУТНИКА

Елементи серендипової сім'ї утворюють корисний клас скінченних елементів. Вони поширені в практичних розрахунках незважаючи на те, що погано формалізуються. Головна проблема серендипових скінченних елементів (ССЕ) полягає в тому, що існуючі методи конструювання функцій форми (метод оберненої матриці, процедура систематичного генерування функцій форми) не дають можливості вийти за рамки стандартних моделей на ССЕ. В стандартних моделях кількість параметрів інтерполяційного полінома відповідає кількості вузлів на границі елемента. Відомо, що стандартні моделі СЕ вищих порядків мають певні недоліки (наприклад, від'ємні значення вузлових навантажень, кратні нулі у граничних вузлах). Тому існує потреба у використанні інших методів конструювання функцій форми і удосконаленні існуючих.

У роботі проаналізована можливість побудови базисних функцій на дискретному елементі у формі n-кутника. Розглянуто скінчений елемент у формі правильного n-ятикутника, його можна використовувати як обчислювальний шаблон у колі. Наразі завдання побудови та дослідження унітарного базису на дискретному n-кутному елементі (пентагоні) не розглядалася. Для конструювання базисів дискретних елементів у формі n-кутників використовувався геометричний метод. Це модифікація методу "product of planes", яка використовує техніку перемноження рівнянь площин і поверхонь другого порядку. Нові методи значно спрощують процедуру побудови базису (не виникає потреби розв'язувати СЛАР відповідного порядку на елементі) і дозволяють отримати альтернативні моделі ССЕ. Наявність "позавузлових" параметрів у моделях, що отримані за допомогою

нових методів, дає можливість позбавитись від недоліків, які притаманні стандартним моделям (наприклад, від від'ємних значень навантажень у вузлах).

Побудовано три системи базисних функцій на *n*-кутнику за допомогою матричного методу, геометричного моделювання і модифікованого методу “product of planes”.

Подальша оптимізація властивостей базисних функцій може бути досягнута за допомогою зваженого усереднення функцій. Запропоновані методи можуть бути поширені на довільні *n*-кутники і узагальнені на випадок просторових дискретних елементів з основою в формі правильного *n*-кутника.

Ключові слова: серендипові скінченні елементи, інтерполяція, функції форми, геометричне моделювання, альтернативний базис вищих порядків.

I. O. ASTIONENKO

Ph.D., Associate Professor,

Associate Professor at the Department of Informatics and Computer Science

Kherson National Technical University

ORCID: 0000-0002-5831-6353

P. Y. GUCHEK

Doctor of Technical Sciences,

Head of the Department of Information Technologies

and Physical and Mathematical Disciplines

Kherson Educational and Scientific Institute

of Admiral Makarov National University of Shipbuilding,

Professor at VIZJA University, Warsaw, Poland

ORCID: 0000-0002-6110-6816

O. M. DUDCHENKO

Ph.D., Associate Professor,

Associate Professor at the Department of Information Technology

and Physical and Mathematical Disciplines

Kherson Educational and Scientific Institute

of Admiral Makarov National University of Shipbuilding

ORCID: 0000-0002-7724-0892

O. I. LYTVYENKO

Ph.D., Associate Professor,

Associate Professor at the Department of Information Technology

and Physical and Mathematical Disciplines

Kherson Educational and Scientific Institute

of Admiral Makarov National University of Shipbuilding

ORCID: 0000-0001-9890-6959.

APPROXIMATIONS ON A FINITE ELEMENT IN THE FORM OF A REGULAR N-GON

The serendipity family of elements constitutes a useful class of finite elements. They are widely employed in practical computations, despite being poorly formalized. The main difficulty with serendipity finite elements (SFE) lies in the fact that existing approaches to constructing shape functions (the inverse matrix method, the systematic shape function generation procedure) do not allow researchers to go beyond the framework of standard SFE models. In standard models, the number of parameters of the interpolation polynomial corresponds to the number of nodes on the element boundary. It is well known that standard higher-order finite element models possess certain drawbacks (e.g., negative values of nodal loads, multiple zeros at boundary nodes). Therefore, there is a need to employ alternative methods for constructing shape functions and to improve the existing ones.

*This study analyzes the possibility of constructing basis functions on a discrete element in the form of an *n*-gon. A finite element in the form of a regular pentagon is considered, which can be used as a computational template within a circle. So far, the problem of constructing and investigating a unitary basis on a discrete pentagonal element (pentagon) has not been addressed. For constructing bases of discrete elements in the form of *n*-gons, a geometric method was applied. This method is a modification of the “product of planes” approach, which employs the technique of multiplying equations of planes and second-order surfaces. The new methods substantially simplify the procedure of basis construction (eliminating the need to solve a system of linear algebraic equations of the corresponding order on the element) and make it possible to obtain alternative SFE models. The presence of “extra-nodal” parameters in the models obtained by these new methods allows one to overcome the drawbacks inherent to standard models (such as negative nodal load values).*

Three systems of basis functions on the pentagon have been constructed using the matrix method, geometric modeling, and a modified “product of planes” method.

Further optimization of the properties of basis functions can be achieved by means of weighted averaging of functions. The proposed techniques can be extended to arbitrary n-gons and generalized to the case of spatial discrete elements with bases in the form of regular n-gons.

Key words: serendipity finite elements, interpolation, shape functions, geometric modeling, alternative higher-order basis.

Постановка проблеми

Поява та розвиток методу скінченних елементів (МСЕ) стимулювали виникнення нових завдань у теорії інтерполяції функцій двох та трьох аргументів [1]. Найбільш розроблена на даний момент техніка трикутних та прямокутних (квадратних) елементів [2,3]. Задачі ядерної енергетики поставили проблему побудови унітарного базису для гексагону в областях із стільниковою геометрією [4]. Полігональні дискретні елементи становлять інтерес розрахунку електростатичних і стаціонарних температурних полів, наприклад, в областях п'ятикутної форми. Якщо дискретний елемент – правильний п'ятикутник, його можна використовувати як обчислювальний шаблон у колі. Наразі завдання побудови та дослідження унітарного базису на дискретному п'ятикутному елементі (пентагоні) не розглядалося.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відомі три способи побудови базису скінченного елемента (СЕ): алгебраїчний, геометричний та ймовірно-геометричний.

Алгебраїчний спосіб полягає у складанні та розв'язанні системи лінійних рівнянь алгебри (СЛАР) для знаходження коефіцієнтів інтерполяційного полінома [3]. При цьому зручно використовувати відому властивість базисних функцій СЕ: базисна функція дорівнює одиниці в однойменному вузлі і дорівнює нулю в інших вузлах СЕ. Але, наприклад, коли елемент гексагональної форми, при розв'язанні СЛАР виникають непереборні труднощі: матриця побудованої системи є виродженою внаслідок надмірної симетрії правильного шестикутника [4].

Сингулярність матриці стала поштовхом для пошуку нових неалгебраїчних способів побудови базисів скінченних елементів. Учаспрес, використовуючи геометричне моделювання, вперше отримав унітарний базис на шестикутнику, функції форми якого дрібно-раціональні [4]. Геометричний спосіб побудови базису скінченного елемента дозволяє отримувати поліноміальні базиси. При геометричному моделюванні поліноміальна базисна функція конструюється з рівнянь нелінійних поверхонь і площин, які проходять через задані точки [5, 6].

Для побудови інтерполяційних поліномів зручно використовувати метод ймовірно-геометричного моделювання, заснований на геометричній ймовірності. Геометрична ймовірність є природним узагальненням поняття класичної ймовірності на випадок незліченної множини елементів і обчислюється як відношення довжин, площ, або об'ємів в одно-, дво- та тривимірних випадках. Цей метод успішно застосовується під час побудови базисів серендипових скінченних елементів (серендиповий елемент – це довільний чотирикутник чи квадрат з вузлами інтерполяції лише на границі елемента) [7].

Формулювання мети статті

Мета статті – проаналізувати можливість побудови базисних функцій на дискретному елементі у формі n-кутника за допомогою алгебраїчного та геометричного підходів.

Викладення основного матеріалу дослідження

У роботі розглянуто елемент у формі правильного п'ятикутника, вписаний у коло одиничного радіусу (рис. 1). На даному елементі побудовано три системи базисних функцій за допомогою алгебраїчного та геометричного підходів.

Перший базис (СПБ_1) побудований за допомогою алгебраїчного підходу з використанням інтерполяційної гіпотези Лагранжа:

$$N_i(x_k, y_k) = \delta_{ik}, \quad i, k = 1, 2, \dots, 5, \quad (1)$$

де δ_{ik} – символ Кронекера.

У якості інтерполяційного поліному була використана функція:

$$N(x, y) = 0,2 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 x^2 + \alpha_4 xy + \alpha_5 y^2. \quad (2)$$

Для визначення коефіцієнтів α_i складемо систему:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 \\ 0,2 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 \\ 0,2 & x_3 & y_3 & x_3^2 & x_3 y_3 & y_3^2 \\ 0,2 & x_4 & y_4 & x_4^2 & x_4 y_4 & y_4^2 \\ 0,2 & x_5 & y_5 & x_5^2 & x_5 y_5 & y_5^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

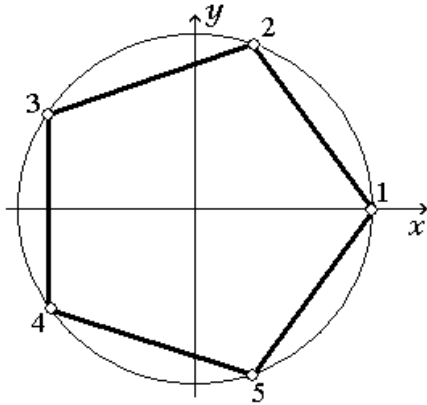


Рис. 1. Дискретний елемент у формі правильного п'ятикутника

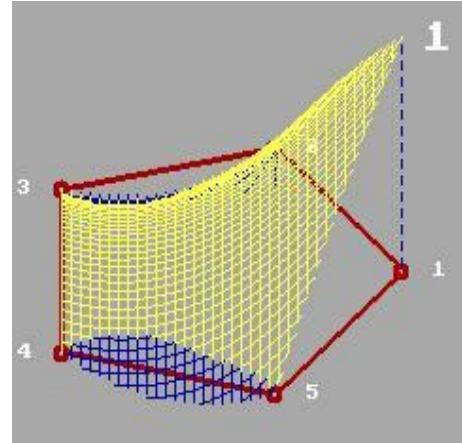


Рис. 2. Візуалізація базисної функції N_1 в 5ПБ_1

Вибір вільного коефіцієнта продиктований геометрією п'ятикутника. Це значення аплікати поверхні, яку задає базова функція у центрі дискретного елемента.

Базисна функція для вузла 1 має вигляд (рис. 2):

$$N_1 = 0,2 + 0,4x + 0,4x^2 - 0,4y^2. \quad (4)$$

Інші базисні функції поліноміального базису (5ПБ_1) можуть бути отримані з N_1 обертанням на кут 72° :

$$N_2 = \frac{1}{5} + \left(\frac{(\sqrt{5}-1)}{10} x + \frac{\sqrt{10+2\sqrt{5}}}{10} y \right) + \left(\frac{\sqrt{5}-1}{10} x + \frac{\sqrt{10+2\sqrt{5}}}{10} y \right)^2 - \left(-\frac{\sqrt{10+2\sqrt{5}}}{10} x + \frac{\sqrt{5}-1}{10} y \right)^2 \quad (5)$$

$$N_3 = \frac{1}{5} - \left(\frac{(\sqrt{5}+1)}{10} x - \frac{\sqrt{10-2\sqrt{5}}}{10} y \right) + \left(-\frac{\sqrt{5}+1}{10} x + \frac{\sqrt{10-2\sqrt{5}}}{10} y \right)^2 - \left(-\frac{\sqrt{10-2\sqrt{5}}}{10} x - \frac{\sqrt{5}+1}{10} y \right)^2 \quad (6)$$

$$N_4 = \frac{1}{5} - \left(\frac{(\sqrt{5}+1)}{10} x + \frac{\sqrt{10-2\sqrt{5}}}{10} y \right) + \left(-\frac{\sqrt{5}+1}{10} x - \frac{\sqrt{10-2\sqrt{5}}}{10} y \right)^2 - \left(-\frac{\sqrt{10-2\sqrt{5}}}{10} x + \frac{\sqrt{5}+1}{10} y \right)^2 \quad (7)$$

$$N_5 = \frac{1}{5} + \left(\frac{(\sqrt{5}-1)}{10} x - \frac{\sqrt{10+2\sqrt{5}}}{10} y \right) + \left(\frac{\sqrt{5}-1}{10} x - \frac{\sqrt{10+2\sqrt{5}}}{10} y \right)^2 - \left(-\frac{\sqrt{10+2\sqrt{5}}}{10} x - \frac{\sqrt{5}-1}{10} y \right)^2 \quad (8)$$

Другий базис (5ПБ_2) побудований за допомогою геометричного моделювання [6]. Для побудови базисної функції N_1 використана композиція прямої (3-4) та параболи, що проходить через 2-P-5 (рис. 3), де $P(-0,809; 0)$:

$$N_1 = 0,2 (0,8090169 + x)(1,2360679 + 1,5278641x - 1,8885438y^2). \quad (9)$$

Базисна функція зображена на рис. 4.

Інші функції отримуємо поворотом на кут 72° :

$$N_2 = 0,2 + 0,1527864x + 0,4702282y - 0,2472136x^2 + 0,3592224xy + 0,2472136y^2 - 0,1055728x^3 - 0,2563143x^2y + 0,1999999y^2 - 0,0343026y^3; \quad (10)$$

$$N_3 = 0,2 - 0,3999999x + 0,290617y + 0,0944272x^2 - 0,581234xy - 0,0944272y^2 + 0,1055728x^3 + 0,2139139x^2y - 0,0111456xy^2 - 0,1453085y^3; \quad (11)$$

$$N_4 = 0,2 - 0,3999999x - 0,290617y + 0,0944272x^2 + 0,581234xy - 0,0944272y^2 + 0,1055728x^3 - 0,2139139x^2y - 0,0111456xy^2 - 0,1453085y^3; \quad (12)$$

$$N_5 = 0.2 + 0.1527864x - 0.4702282y - 0.2472136x^2 - 0.3592224xy + 0.2472136y^2 - 0.1055728x^3 + 0.2563143x^2y + 0.1999999y^2 + 0.0343026y^3. \tag{13}$$

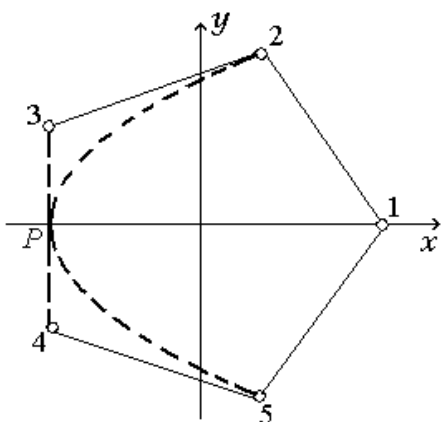


Рис. 3. Композиція ліній при побудові базисної функції N_1 в 5ПБ_2

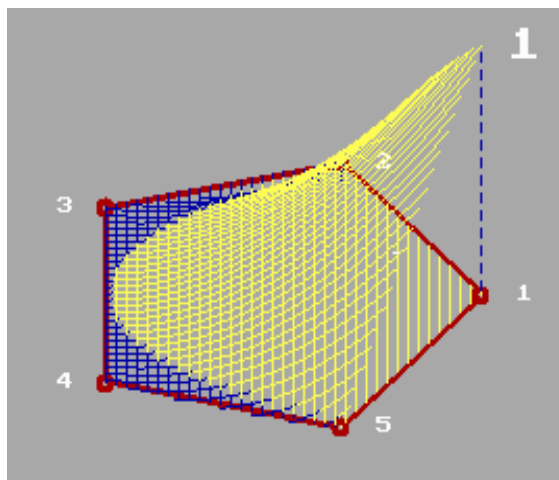


Рис. 4. Візуалізація базисної функції N_1 в 5ПБ_2

Методика побудови дробово-раціонального базису (5ДРБ) подібна до побудови ДРБ на гексагональному елементі [5]. П'ятикутник розбивається на 3 трикутники. Наприклад, при побудові N_1 використовується три трикутника за спільною вершиною: $\Delta 123$, $\Delta 134$ і $\Delta 145$. У кожному трикутнику використовується площина, яка проходить через сторону трикутника, що протилежна вузлу 1 і точку з координатами $(1,0,1)$, а потім знаходять добуток рівнянь цих площин. При цьому отримуємо систему із п'яти поліномів, які не задовольняють умові збереження вагового балансу:

$$\sum_{i=1}^5 N_i(x, y) = 1. \tag{14}$$

Сума базисних функцій дорівнює (рис. 5):

$$\sum_{i=1}^5 N_i(x, y) = 1,17082 - 0,17082x^2 - 0,17082y^2. \tag{15}$$

Нормуємо функції за допомогою функціонального множника $(1,17082 - 0,17082x^2 - 0,17082y^2)^{-1}$, і отримуємо дробово-раціональний базис (5ДРБ) на п'ятикутному елементі (рис. 6):

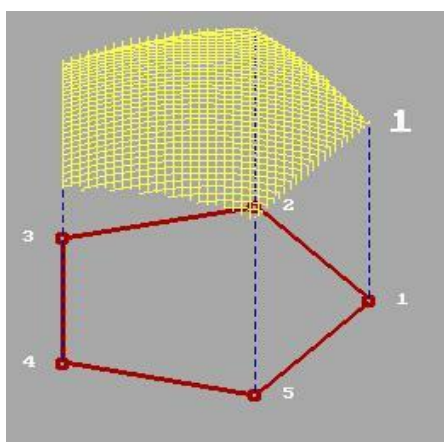


Рис. 5. Сума базисних функцій (формула 15)

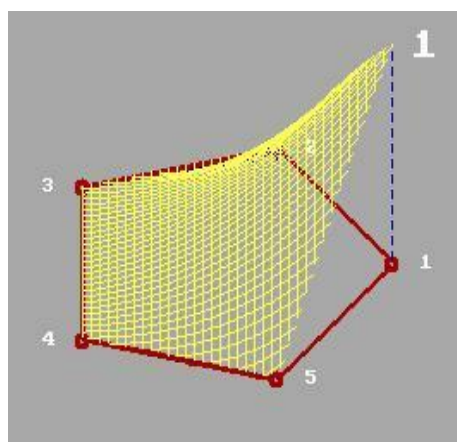


Рис. 6. Візуалізація функції N_1 в 5ДРБ

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{0,23 + 0,46833x + 0,25527x^2 + 0,04223x^3 - 0,32361y^2 - 0,4xy^2}{1,17082 - 0,17082x^2 - 0,17082y^2}; \\
 N_2 &= \frac{0,23 + 0,14x + 0,45y - 0,27x^2 + 0,34xy - 0,21y^2 - 0,11x^3 + 0,25xy^2 - 0,26x^2y}{1,17082 - 0,17082x^2 - 0,17082y^2}; \\
 N_3 &= \frac{0,23 - 0,38x + 0,28y + 0,06x^2 - 0,55xy - 0,12y^2 + 0,09x^3 - 0,05xy^2 + 0,28x^2y - 0,14y^3}{1,17082 - 0,17082x^2 - 0,17082y^2}; \\
 N_4 &= \frac{0,23 - 0,38x - 0,28y + 0,06x^2 + 0,55xy - 0,12y^2 + 0,09x^3 - 0,05xy^2 - 0,28x^2y + 0,14y^3}{1,17082 - 0,17082x^2 - 0,17082y^2}; \\
 N_5 &= \frac{0,23 + 0,14x - 0,45y - 0,27x^2 - 0,34xy - 0,21y^2 - 0,11x^3 + 0,25xy^2 + 0,26x^2y}{1,17082 - 0,17082x^2 - 0,17082y^2}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

Звернемо увагу на важливі властивості поліномів $N_i(x, y)$ у всіх трьох побудованих базисах [3].

Властивість 1. Кожен поліном $N_i(x, y)$ дорівнює одиниці в точці (x_i, y_i) і обертається в нуль у всіх інших вузлах.

Властивість 2. Апроксимуючі функції $N_i(x, y)$ локальні в межах елемента.

Умова збереження вагового балансу $\sum_{i=1}^5 N_i(x, y) = 1$ у всіх базисах дотримана.

Висновки

За допомогою алгебраїчної та геометричної процедур вперше отримано три системи базисних функцій на дискретному елементі у формі правильного п'ятикутника та доведено, що задача відновлення функції за її значеннями у вершинах п'ятикутного елемента має безліч розв'язків. Подальша оптимізація властивостей базисних функцій може бути досягнута за формулою [6]:

$$N_i^{(k)} = (1 - \alpha)N_i^{(m)} + \alpha N_i^{(n)}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1. \tag{28}$$

Методики побудови можуть бути застосовані до будь-яких полігональних дискретних елементів.

Список використаної літератури

1. Strang G., Fix G. J. An Analysis of the Finite Element Method. New Jersey: Prentice-Hall. Inc, 1973. 306 p.
2. Mitchell A.R., Wait R. The Finite Element Method in Partial Differential Equations. London : John Wiley & Sons, 1977. 198 p.
3. Wachspress E.I. A rational finite element basis. Academic Press. New York, 1975, 342 p.
4. Ishiguro M. Construction of Hexagonal Basis Functions Applied in the Galerkin-Type Finite Element Method. *Journal of Information Processing*. 1984, Vol.7, № 2, P. 88-95.
5. Astionenko I.O., Litvinenko O.I., Osipova N.V., Tuluchenko G.Ya., Khomchenko A.N. Cognitive-graphic Method for Constructing of Hierarchical Form of Basic Functions of Biquadratic Finite Element. *Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences* : Proceedings of the AIP Conference, Albena. 22-27 June 2016. Albena, Bulgaria. **1773**. 040002. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4964965>.
6. Guchek P., Litvinenko O., Astionenko I., Dudchenko O., Khomchenko A. Research of Alternative Models of Serendipity Finite Elements Using Model Problems. In: So In, C., Londhe, N.D., Bhatt, N., Kitsing, M. (eds). *Information Systems for Intelligent Systems*. Proceedings of the Conference ISBM'2023. 7-8 September 2023. Bangkok, Thailand. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, Vol. 379. Singapore : Springer, 2024. P. 471-481. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8612-5_38.
7. Guchek P., Litvinenko O., Astionenko I., Dudchenko O. Multiparametric basis functions on the finite element Q12. *International Conference On Industry Sciences and Computer Sciences Innovation*. Proceedings of the Conference iSCSi'2024. 29-31 October 2024. Portugal. *Procedia Computer Science*, Vol. 263. Lisbon : Portugal, 2025. P. 608-618. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.07.073>.

References

1. Strang, G., & Fix, G. J. (1973). An Analysis of the Finite Element Method. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. [In English].
2. Mitchell, A.R., & Wait, R. (1977). The Finite Element Method in Partial Differential Equations, London : John Wiley & Sons. [In English].
3. Wachspress, E.I. (1975). A rational finite element basis. New York : Academic Press. [In English].

4. Ishiguro, M. (1984). Construction of Hexagonal Basis Functions Applied in the Galerkin-Type Finite Element Method. *Journal of Information Processing*, 7(2). 88-95. [In English].

5. Astionenko, I.O., Litvinenko, O.I., Osipova, N.V., Tuluchenko, G.Ya., & Khomchenko, A.N. (2016). Cognitive-graphic Method for Constructing of Hierarchical Form of Basic Functions of Biquadratic Finite Element. *Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences* : Proceedings of the AIP Conference. Albena, Bulgaria. **1773**. 040002. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4964965> [In English].

6. Guchek, P., Litvinenko, O., Astionenko, I., Dudchenko, O., & Khomchenko, A. (2024). Research of Alternative Models of Serendipity Finite Elements Using Model Problems. In: So In, C., Londhe, N.D., Bhatt, N., Kitsing, M. (eds). *Information Systems for Intelligent Systems*. Proceedings of the Conference ISBM'2023. Bangkok, Thailand. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, **379**. Singapore : Springer, 2024. 471-481. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8612-5_38. [In English].

7. Guchek, P., Litvinenko, O., Astionenko, I., & Dudchenko, O. (2025). Multiparametric basis functions on the finite element Q12. *International Conference On Industry Sciences and Computer Sciences Innovation*. Proceedings of the Conference iSCSi'2024. Portugal. *Procedia Computer Science*, **263**. Lisbon : Portugal, 2025. 608-618. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.07.073>. [In English].

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

М. В. БЕБЕХ

незалежний дослідник

Astro Machine Corporation (дочірня компанія AstroNova, Inc.)

ORCID: 0009-0007-5126-5438

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ АІ ДЛЯ ПЕРСОНАЛІЗАЦІЇ НАВЧАННЯ З 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДРУКУ В STEM-ОСВІТІ

Актуальність дослідження зумовлена низьким рівнем впровадження 3D-принтерів у закладах освіти України, відсутністю адаптивних методик навчання та складністю оволодіння 3D-технологіями без індивідуальної підтримки. З огляду на швидкий розвиток АІ та зростання ролі 3D-друку в інженерній освіті, виникає потреба у створенні ефективних інтелектуальних інструментів, здатних покращити засвоєння студентами технічних навичок. Метою дослідження є розробка й експериментальна перевірка моделі АІ-персоналізації навчання 3D-моделюванню й 3D-друку з використанням 3D-принтерів Vernerfab у курсах STEM-спрямування. Методологія ґрунтується на порівнянні результатів контрольної та експериментальної груп, де експериментальна взаємодіяла з АІ-модулем, що здійснював аналіз STL-файлів, генерував персоналізовані підказки, рекомендував параметри 3D-друку та адаптував складність завдань. Результати показали суттєві переваги АІ-підтримки: зменшення топологічних помилок на 67%, збільшення частки моделей, придатних до друку з першого разу, на 37 п.п., підвищення точності друку та скорочення часу виконання проєкту приблизно на 30%. Експериментальна група продемонструвала значно вищий приріст навичок складного моделювання та підготовки моделей до друку. Також виявлено позитивний вплив АІ на мотивацію, відчуття підтримки та задоволеність навчанням. У висновках підкреслено, що інтеграція АІ у навчання 3D-моделюванню та 3D-друку є дієвим шляхом персоналізації STEM-освіти та підвищення якості підготовки здобувачів. Застосована модель може бути масштабована для використання в освітніх закладах різного рівня. Перспективи подальших досліджень передбачають розширення функціоналу АІ-системи, інтеграцію багатокomпонентних моделей адаптивного навчання, вивчення довгострокового впливу АІ на успішність студентів.

Ключові слова: 3D-друк, 3D-принтер, АІ-інновації, STEM-освіта, 3D-принтери Vernerfab, АІ у навчанні.

М. V. BEBEKH

Independent Researcher

Astro Machine Corporation (a wholly owned subsidiary of AstroNova, Inc.)

ORCID: 0009-0007-5126-5438

PROSPECTS OF USING AI TO PERSONALIZE TEACHING IN 3D MODELING AND PRINTING IN STEM EDUCATION

The relevance of the study is due to the low level of implementation of 3D printers in educational institutions of Ukraine, the lack of adaptive teaching methods and the difficulty of mastering 3D technologies without individual support. Given the rapid development of AI and the growing role of 3D printing in engineering education, there is a need to create effective intellectual tools that can improve students' mastery of technical skills. The purpose of the study is to develop and experimentally test a model of AI-personalization of 3D modelling and 3D printing training using Vernerfab 3D printers in STEM courses. The methodology is based on comparing the results of the control and experimental groups, where the experimental group interacted with an AI module that analyzed STL files, generated personalized prompts, recommended 3D printing parameters and adapted the complexity of tasks. The results showed significant benefits of AI support: a 67% reduction in topological errors, a 37% increase in the proportion of models that are printable the first time, an increase in printing accuracy, and a reduction in project execution time by approximately 30%. The experimental group demonstrated a significantly higher increase in complex modelling skills and model preparation for printing. AI also had a positive impact on motivation, a sense of support, and satisfaction with learning. The conclusions emphasize that integrating AI into 3D modelling and 3D printing education is an effective way to personalize STEM education and improve the quality of student training. The applied model can be scaled for use in educational institutions of various levels. Prospects for further research include expanding the functionality of the AI system, integrating multi-component adaptive learning models, and studying the long-term impact of AI on student success.

Key words: 3D printing, 3D printer, AI innovation, STEM education, Vernerfab 3D printers, AI in education.

Постановка проблеми

Розвиток STEM-освіти вимагає формування у здобувачів освіти компетентностей, пов'язаних з інженерією, цифровим проектуванням та технологічною творчістю. Важливою технологією сучасного інженерного середовища є 3D-моделювання та 3D-друк, що забезпечують повний цикл створення фізичних об'єктів: від проектування у цифровому середовищі до виготовлення на 3D-принтері. Однак ефективне засвоєння цих технологій потребує спеціалізованих знань і навичок, які значною мірою перевищують стандартні можливості шкільних програм.

Розвиваються AI-інновації у сфері освіти відкриває нові можливості персоналізації навчального процесу. Системи штучного інтелекту здатні адаптувати навчальні матеріали, аналізувати помилки, формувати індивідуальні рекомендації та забезпечувати зворотний зв'язок у режимі реального часу. Однак саме в контексті навчання 3D-моделювання та роботи з 3D-принтерами такі системи майже не застосовуються.

Таким чином, проблема полягає у необхідності розробки моделі штучного інтелекту для персоналізації навчання 3D-моделюванню та 3D-друку, яка б забезпечувала:

- адаптивне навчання роботі з 3D-моделями та 3D-принтерами;
- автоматичний аналіз STL-файлів, виявлення критичних помилок та формування рекомендацій;
- персоналізований супровід учня під час усіх етапів створення та друку моделі;
- зниження вхідного порогу у складні технології для тих, хто не має попередньої технічної підготовки;
- підтримку педагогів у використанні 3D-принтерів в умовах недостатнього досвіду та ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Низка робіт демонструє, що впровадження 3D-друку здатне значно підвищити інженерні компетентності учнів. У дослідженні [1] автори показали, що 3D-принтери забезпечують розвиток просторового мислення, інженерного підходу та креативності як у загальноосвітніх школах, так і в закладах для учнів з особливими освітніми потребами. Подібні результати подано в роботі [2], де доведено ефективність 3D-моделювання для інтерпретації складних фізичних явищ, підкресливши, що STEM-технології сприяють глибшому розумінню абстрактних концептів.

У публікації [3] встановлено, що застосування 3D-друку з повторюваним моделюванням підвищує професійний інтерес, стимулює інженерне мислення та розвиває уяву учнів. Подібно до цього, у науковій роботі [4] отримано висновок, що рівень інтеграції 3D-друку у навчальний процес корелює зі зростанням інтересу до STEM-кар'єр. Проте вказується, що ефективність залежить від підготовленості вчителя та наявності матеріально-технічної бази.

У науковій праці [5] зосереджено увагу на педагогічних аспектах: автори виявили значні відмінності в уявленнях учителів щодо використання 3D-моделювання та друку. Частина педагогів сприймає ці технології як інструмент творчого проектування, інші – як потенційно складний і ресурсовитратний компонент навчання, що потребує додаткової підтримки.

Популярним напрямком в дослідженнях є застосування AI для персоналізації навчальної діяльності. Авторі підкреслюють [6], що використання систем штучного інтелекту сприяє персоналізації способів подання матеріалу, зниженню когнітивного навантаження та формуванню адаптивних сценаріїв навчання. У статті [7] розглядаються виклики, пов'язані з інтеграцією штучного інтелекту, зокрема технічні бар'єри, відсутність педагогічних моделей використання та етичні аспекти.

У дослідженні [8] обґрунтовано потенціал AI-підходів для підвищення індивідуалізації вищої STEM-освіти, зокрема завдяки автоматизованому аналізу помилок та адаптивним рекомендаціям. Подібні ідеї розвинуто у праці [9], які демонструють можливість застосування високопродуктивних обчислень та AI для створення систем персоналізації навчальних траєкторій.

Наукова стаття [10] присвячена ефективності AI-орієнтованих підходів для учнів молодшої та середньої школи: інтелектуальні системи допомагають вибудовувати індивідуальні програми, оптимізувати темп навчання та знижувати перешкоди при опануванні складних STEM-дисциплін.

Українські роботи підтверджують глобальні тенденції. У дослідженні [11] автори підкреслюють, що інформаційні технології та інтелектуальні системи є важливими чинниками розвитку STEM-освіти в Україні, однак їх впровадження обмежене ресурсно. У роботі [12] досліджують адаптивні платформи персоналізованого навчання та відзначають високу ефективність AI-інструментів для підтримки індивідуальних освітніх траєкторій.

Попри значну кількість публікацій, наукова література фактично не містить досліджень, присвячених застосуванню штучного інтелекту саме для персоналізації навчання з 3D-моделювання та 3D-друку. У більшості робіт роль AI обмежується загальними можливостями адаптації навчання, а роль 3D-принтерів – методами практичної діяльності у STEM. Зокрема не розглянуто розробки комплексних AI-систем, що супроводжують учня від створення моделі до її друку.

У зв'язку з цим виникає потреба у створенні та випробуванні моделі застосування AI для персоналізації навчання 3D-моделюванню та 3D-друку, що і визначає мету даного дослідження.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка та експериментальна перевірка моделі застосування штучного інтелекту для персоналізації навчання 3D-моделюванню та 3D-друку в STEM-освіті, яка забезпечує індивідуальний супровід учня на всіх етапах роботи.

Для досягнення поставленої мети було поставлено такі завдання:

1. Розробка прототипу AI-підсистеми, здатної здійснювати персоналізовану підтримку учнів у процесі створення та друку 3D-моделей, включно з підбором параметрів друку.
2. Провести експеримент, спрямований на оцінювання ефективності запропонованої моделі у навчанні здобувачів освіти навичкам 3D-моделювання та роботи з 3D-принтером.
3. Проаналізувати результати експерименту та визначити рівень впливу AI-персоналізації на засвоєння знань, якість створених моделей, кількість помилок друку, часову ефективність та мотивацію учнів.

Викладення основного матеріалу дослідження

У рамках дослідження була розроблена й реалізована інтелектуальна навчальна система (ІНС), що поєднувала:

- AI-тьютор – мовну модель, спеціально налаштовану для навчання 3D-моделюванню, підбору параметрів друку та оцінки якості моделей;
- модуль аналізу 3D-моделей – інструменти, що дозволяють AI виявляти помилки у файлах STL/OBJ (некоректні нормалі, недостатню товщину стінки, проблемні нависання, несущільну геометрію тощо);
- систему рекомендацій параметрів друку;
- адаптивний генератор навчальних завдань – система, яка формувала індивідуальні проекти для кожного студента.

Структура моделі персоналізації представлена на рис. 1.

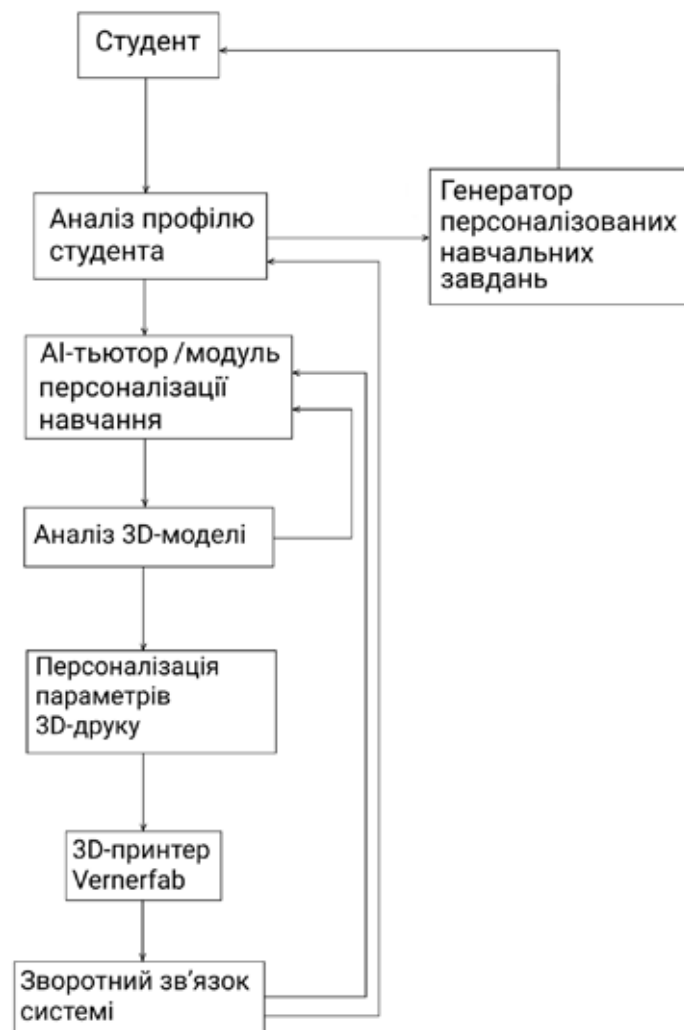


Рис. 1. Схема запропонованої моделі

AI-система працювала на основі трьох взаємопов'язаних механізмів:

1. Аналіз профілю студента.

На етапі діагностики проводилася оцінка просторового мислення, попереднього досвіду роботи з 3D-модельюванням, темпу виконання навчальних кроків, частоти помилок, переваг стилю навчання (візуальний, вербальний, кроковий, проблемно-орієнтований).

Отримані дані формували індивідуальний навчальний профіль, який використовувався AI-модулем для адаптації подальшого навчального контенту.

2. Адаптивна підтримка в процесі 3D-модельювання.

Під час виконання завдань AI аналізував дії студента та надавав динамічні підказки щодо використання інструментів модельювання, персоналізовані пояснення залежно від стилю навчання (візуальні схеми, текстові інструкції, відеофрагменти або покрокові алгоритми), рекомендації щодо топології моделі, попередження про конструктивні недоліки, які можуть вплинути на успішність друку.

3. Персоналізація параметрів 3D-друку.

AI аналізував STL-модель студента й автоматично пропонував оптимізовані параметри друку: висоту шару, заповнення, кількість оболонок, швидкість друку, структуру підтримок.

Під час роботи використовувався 3D-принтер Vernerfab, інтегрований до системи через модуль аналізу G-коду.

Хід експерименту. Експеримент було проведено з метою оцінювання ефективності запропонованої моделі застосування штучного інтелекту для персоналізації навчання 3D-модельюванню та 3D-друку. Дослідження здійснювалося у три етапи: підготовчий, формувальний та підсумковий.

1. На підготовчому етапі було здійснено добір учасників, визначення початкового рівня підготовки, налаштування матеріально-технічної бази, підготовка навчальних завдань.

У експерименті взяли участь 24 здобувачі освіти, розділені на експериментальну групу ($n = 12$) та контрольну групу ($n = 12$). Групи формувалися таким чином, щоб учасники мали приблизно однаковий початковий рівень володіння 3D-модельюванням.

Експериментальна група працювала з використанням AI-підсистеми, розробленої в межах дослідження, тоді як контрольна група виконувала завдання традиційним методом.

Була сформована серія з 6 однакових навчальних модулів, які включали:

- створення 3D-моделі;
- аналіз помилок;
- вибір параметрів друку;
- виконання друку;
- оцінку результатів.

2. Безпосередньо експеримент.

Учасники експериментальної групи виконували ті самі завдання, що й контрольна група, але з використанням таких функцій штучного інтелекту:

- аналіз STL-файлів;
- адаптивні рекомендації;
- автоматичний підбір параметрів друку;
- моніторинг та корекція у реальному часі;
- створення індивідуальних освітніх траєкторій.

Учасники контрольної групи виконували ідентичні завдання без AI-підтримки. Викладач забезпечував консультації у традиційному режимі, без автоматичних підказок, аналізаторів STL-файлів або адаптивних рекомендацій.

3. Підсумковий етап.

Після завершення навчальних модулів усім учасникам було запропоновано підсумкове завдання – створити складнішу 3D-модель та надрукувати її з першої спроби. На цьому етапі проводилося:

- оцінювання якості підсумкової моделі (за єдиними критеріями);
- підрахунок кількості помилок у підготовці до друку;
- вимірювання часу виконання завдання;
- фіксація кількості невдалих друків;
- опитування щодо суб'єктивного досвіду навчання, включно з рівнем упевненості, мотивації та зниженням труднощів.

Результати. Отримані значення контрольованих параметрів представлені в таблицях 1-6.

Дані таблиці 1 вказують на ефективність системи рекомендацій та автоматичних підказок, які допомагали студентам своєчасно виявляти і виправляти недоліки моделі.

Показники успішності друку підкріплюють тенденцію, виявлену в моделюванні. Експериментальна група отримала успішний друк із першої спроби у 74% випадків, що майже вдвічі більше за контрольну (38%). Зменшення середньої кількості повторних друків ($2,1 \rightarrow 1,3$) демонструє економію часу та матеріалів. Також

значно покращилась точність виготовлених деталей, про що свідчить майже трикратне зменшення відхилень від номінальних розмірів (1,42 мм → 0,58 мм). Зниження частоти дефектів (27% → 11%) вказує на те, що AI-рекомендації щодо налаштувань друку мали суттєвий практичний ефект.

Таблиця 1

Успішність виконання 3D-моделей

Показник	Контрольна	Експериментальна (AI)	Різниця
Середня кількість критичних топологічних помилок	3,4	1,1	-67%
Середня кількість некритичних помилок (нормалі, стінки)	7,9	3,2	-59%
Частка моделей, придатних до друку з першого разу	41%	78%	+37 п.п.

Таблиця 2

Успішність 3D-друку

Показник	Контрольна	Експериментальна (AI)
Успішні друки з першого разу	38%	74%
Середня кількість повторних друків	2,1	1,3
Відхилення від розмірів (мм)	1.42 мм	0.58 мм
Частота дефектів (деформація, delamination)	27%	11%

Таблиця 3

Динаміка навчання (Pre-test → Post-test)

Навичка	Контрольна (Δ%)	Експериментальна (Δ%)	Приріст переваги AI
Прості операції 3D-моделювання	22%	48%	+26 п.п.
Складне моделювання (механічні частини)	11%	39%	+28 п.п.
Розуміння топології	18%	51%	+33 п.п.
Підготовка до друку (slicing)	14%	46%	+32 п.п.

Дані таблиці 3 свідчать, що студенти експериментальної групи демонстрували істотно вищий приріст результатів у всіх оцінюваних компетентностях.

Таблиця 4

Час виконання завдань

Показник	Контрольна	Експериментальна (AI)
Час створення моделі (середній)	4 год 12 хв	3 год 05 хв
Час підготовки до друку	38 хв	21 хв
Загальний час на проєкт	5 год 31 хв	3 год 47 хв

Результати в таблиці 4 дозволяють зробити висновок, що AI-підтримка сприяє істотній оптимізує часових витрат на всіх етапах.

Таблиця 5

Рівень мотивації і задоволеності

Показник	Контрольна	Експериментальна
Мотивація виконувати наступні завдання	3,2	4,6
Відчуття підтримки	2,9	4,8
Чіткість пояснень	3,4	4,7
Відчуття прогресу	3,1	4,5
Загальна задоволеність курсом	3,5	4,8

Показники опитування показують суттєве покращення емоційного та освітнього досвіду студентів експериментальної групи.

Аналіз логів персоналізації підтверджує активне використання AI-системи студентами та її реальний вплив на процес навчання.

Таблиця 6

Логи персоналізації

Метрика	Значення
Середня кількість персоналізованих підказок на студента	27,4
Кількість автоматичних виправлень STL-моделей	6,1
Кількість змін у складності завдань	3,7
Середня кількість рекомендованих оптимізацій параметрів друку	4,9

Висновки

Проведене експериментальне дослідження підтвердило ефективність інтеграції штучного інтелекту у процес навчання 3D-моделюванню та 3D-друку в STEM-освіті. Аналіз результатів показав, що використання AI-підтримки значно підвищує якість створюваних студентами моделей, скорочує кількість технічних помилок та підвищує успішність 3D-друку. Отримані дані свідчать про систематичне покращення навчальних результатів у всіх основних розділах: засвоєнні базових і складних операцій 3D-моделювання, розумінні топології та підготовці моделей до друку.

Студенти експериментальної групи продемонстрували суттєво вищий приріст навчальних результатів у порівнянні з контрольною групою. Найбільший ефект AI простежується у зменшенні критичних помилок моделювання (-67%), покращенні придатності моделей до друку з першого разу (+37 п.п.) та підвищенні точності виготовлення деталей (зменшення відхилення від розмірів у 2,5 раза). Це свідчить про те, що AI сприяв кращому розумінню студентами логіки побудови 3D-моделі та формуванню стійких практичних навичок.

Також було встановлено, що застосування інтелектуальних рекомендацій і автоматичних підказок суттєво оптимізує часові витрати студентів. Експериментальна група виконувала проєкт швидше приблизно на 30%, що пояснюється зменшенням кількості повторних спроб, більш ефективною підготовкою моделей до друку та уникненням типових топологічних помилок. Це свідчить про потенціал AI-технологій не лише підвищувати якість навчання, а й робити його більш раціональним та ресурсоефективним.

Студенти експериментальної групи повідомили про відчутно вищий рівень підтримки, зрозумілості пояснень та усвідомлений прогрес у навчанні. Зростання внутрішньої мотивації, задоволеності курсом та відчуття контролю над процесом опанування складних технічних навичок підтверджує, що AI може виступати ефективним інструментом персоналізації освітнього досвіду.

Отже, впровадження AI у процес навчання 3D-моделюванню та друку забезпечує комплексний позитивний ефект – когнітивний, практичний, часовий та психологічний. Це дозволяє стверджувати, що такі технології мають високий потенціал для масштабування в системі STEM-освіти, особливо в умовах недостатнього доступу до обладнання та високої варіативності рівня підготовки студентів. Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням AI-моделей персоналізації, розробкою спеціалізованих навчальних середовищ з адаптивними сценаріями та вивченням довгострокового впливу таких підходів на освітні траєкторії.

Список використаної літератури

1. Kefalis C., Skordoulis C., Drigas A. The Role of 3D Printing in Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) Education in General and Special Schools. *International Journal of Online & Biomedical Engineering*. 2024. № 20(12). DOI: 10.3991/ijoe.v20i12.48931
2. Usembayeva I., Kurbanbekov B., Ramankulov S., Batyrbekova A., Kelesbayev K., Akhanova A. 3D Modeling and Printing in Physics Education: The Importance of STEM Technology for Interpreting Physics Concepts. *Qubahan Academic Journal*. 2024. № 4(3). P. 45–58. DOI: <https://doi.org/10.48161/qaj.v4n3a727>
3. Lin K. Y., Lu S. C., Hsiao H. H., Kao C. P., Williams P. J. Developing student imagination and career interest through a STEM project using 3D printing with repetitive modeling. *Interactive Learning Environments*. 2023. № 31(5). P. 2884–2898. DOI: <https://doi.org/10.1080/10494820.2021.1913607>
4. Cheng L., Antonenko P. P., Ritzhaupt A. D., MacFadden B. Exploring the role of 3D printing and STEM integration levels in students' STEM career interest. *British Journal of Educational Technology*. 2021. № 52(3). P. 1262–1278. DOI: <https://doi.org/10.1111/bjet.13077>
5. Anđić B., Ulbrich E., Dana-Picard T., Cvjetičanin S., Petrović F., Lavicza Z., Maričić M. A phenomenography study of STEM teachers' conceptions of using three-dimensional modeling and printing (3DMP) in teaching. *Journal of Science Education and Technology*. 2023. № 32(1). P. 45–60. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10956-022-10005-0>
6. Barkoczi N., Maier M. L., Horvat-Marc A. The impact of artificial intelligence on personalized learning in STEM education. In: *INTED2024 Proceedings. IATED*. 2024. P. 4980–4989. DOI: 10.21125/inted.2024.1289
7. Joseph O. B., Uzundu N. C. Integrating AI and Machine Learning in STEM education: Challenges and opportunities. *Computer Science & IT Research Journal*. 2024. № 5(8). P. 1732–1750. DOI: 10.51594/csitrj.v5i8.1379

8. Nikhil V. A Comprehensive Study on AI-Enhanced Personalized Learning in STEM Courses. In: Adopting Artificial Intelligence Tools in Higher Education. CRC Press. 2024. P. 149–170.
9. Huang J., Zhong Y., Chen X. Adaptive and personalized learning in STEM education using high-performance computing and artificial intelligence. The Journal of Supercomputing. 2025. № 81(8). P. 981. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-025-07481-7>
10. Zhang L., Qu J., Zhang Z. The Impact of Personalized Learning Driven by Artificial Intelligence on STEM Education in Primary and Secondary Schools. International Journal of New Developments in Education. 2024. № 6(10). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.01666>
11. Серденко Т. В., Рейс Т. Т., Панченко О. Д. Інформаційні технології як ключовий інструмент у STEM-освіті: сучасний стан і перспективи. 2024. URL: <http://dspace.msu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/12491>
12. Мисюк О. Ю., Постова С. А., Черняк Ю. Г. Персоналізація STEM-навчання за допомогою ШІ: адаптивні платформи. Педагогічна Академія: наукові записки. 2025. № 16. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15109471>

References

1. Kefalis, C., Skordoulis, C., & Drigas, A. (2024). The Role of 3D Printing in Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) Education in General and Special Schools. International Journal of Online & Biomedical Engineering, 20(12). <https://doi.org/10.3991/ijoe.v20i12.48931>
2. Usembayeva, I., Kurbanbekov, B., Ramankulov, S., Batyrbekova, A., Kelesbayev, K., & Akhanova, A. (2024). 3D Modeling and Printing in Physics Education: The Importance of STEM Technology for Interpreting Physics Concepts. Qubahan Academic Journal, 4(3), 45-58. <https://doi.org/10.48161/qaj.v4n3a727>
3. Lin, K. Y., Lu, S. C., Hsiao, H. H., Kao, C. P., & Williams, P. J. (2023). Developing student imagination and career interest through a STEM project using 3D printing with repetitive modeling. Interactive Learning Environments, 31(5), 2884-2898. <https://doi.org/10.1080/10494820.2021.1913607>
4. Cheng, L., Antonenko, P. P., Ritzhaupt, A. D., & MacFadden, B. (2021). Exploring the role of 3D printing and STEM integration levels in students' STEM career interest. British journal of educational technology, 52(3), 1262-1278. <https://doi.org/10.1111/bjet.13077>
5. Anđić, B., Ulbrich, E., Dana-Picard, T., Cvjetićanin, S., Petrović, F., Lavicza, Z., & Maričić, M. (2023). A phenomenography study of STEM teachers' conceptions of using three-dimensional modeling and printing (3DMP) in teaching. Journal of Science Education and Technology, 32(1), 45-60. <https://doi.org/10.1007/s10956-022-10005-0>
6. Barkoczi, N., Maier, M. L., & Horvat-Marc, A. (2024). The impact of artificial intelligence on personalized learning in STEM education. In INTED2024 proceedings (pp. 4980-4989). IATED. <https://doi.org/10.21125/inted.2024.1289>
7. Joseph, O. B., & Uzodu, N. C. (2024). Integrating AI and Machine Learning in STEM education: Challenges and opportunities. Computer Science & IT Research Journal, 5(8), 1732-1750. <https://doi.org/10.51594/csitrj.v5i8.1379>
8. Nikhil, V. (2024). A Comprehensive Study on AI-Enhanced Personalized Learning in STEM Courses. In Adopting Artificial Intelligence Tools in Higher Education (pp. 149-170). CRC Press.
9. Huang, J., Zhong, Y., & Chen, X. (2025). Adaptive and personalized learning in STEM education using high-performance computing and artificial intelligence. The Journal of Supercomputing, 81(8), 981. <https://doi.org/10.1007/s11227-025-07481-7>
10. Zhang, L., Qu, J., & Zhang, Z. (2024). The Impact of Personalized Learning Driven by Artificial Intelligence on STEM Education in Primary and Secondary Schools. International Journal of New Developments in Education, 6(10). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.01666>
11. Serdenko, T. V., Reis, T. T., & Panchenko, O. D. (2024). Informatsiyini tekhnolohii yak kliuchovyi instrument u STEM-osviti: suchasnyi stan i perspektyvy [Information Technology as a Key Tool in STEM Education: Current Status and Prospects]. Retrieved from <http://dspace.msu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/12491> [in Ukrainian].
12. Mysiuk, O. Yu., Postova, S. A., & Cherniak, Yu. H. (2025). Personalizatsiia STEM-navchannia za dopomohoiu ShI: adaptivni platformy [Personalization of STEM Learning Using AI: Adaptive Platforms]. Pedagogichna Akademiia: naukovyi zapysky, № 16. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15109471> [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

Р. М. ГАЛАГАН

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-7470-8392

А. А. САКУТА

магістрантка кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0004-5889-0488

А. С. МОМОТ

доктор філософії, доцент,
старший викладач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-9092-6699

О. В. МУРАВЬОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-7699-0245

О. А. ПОВШЕНКО

доктор філософії,
асистент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-2998-5950

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЧОТИРИНОГИХ РОБОТІВ З ФУНКЦІЄЮ ГОЛОСОВОГО УПРАВЛІННЯ

Сучасний етап розвитку робототехніки характеризується переходом від детермінованих спеціалізованих до інтелектуальних автономних систем, здатних функціонувати у складних та непередбачуваних середовищах. Особливу увагу привертають чотириногі мобільні роботи, які поєднують високу стійкість, прохідність і маневреність, забезпечуючи ефективність там, де колісні або гусеничні мобільні платформи втрачають працездатність. Разом з тим, розробка таких систем залишається складним завданням, що потребує удосконалення механічної архітектури, оптимізацію енергоспоживання, впровадження нових алгоритмів керування та систем взаємодії з людиною. Метою досліджень є комплексний аналіз сучасного стану розвитку чотириногих роботів і визначення перспектив їх удосконалення. У результаті проведеного аналізу визначено основні тенденції розвитку галузі: удосконалення біонічних конструктивних рішень, впровадження технологій штучного інтелекту (зокрема, глибокого навчання з підкріпленням) у системи керування рухом та розвиток природномовної взаємодії між людиною і роботом. На основі узагальнення даних запропоновано концептуальну архітектуру інтелектуального чотиринового робота з інтегрованим голосовим управлінням, що об'єднує модулі штучного інтелекту, розпізнавання мовлення та комп'ютерного зору. Практичне значення роботи полягає у формуванні узагальненої моделі взаємодії людина–робот, здатної забезпечити інтуїтивне керування мобільними платформами та підвищити ефективність їх використання у складних реальних умовах, в яких робот повинен не тільки орієнтуватись на голосові команди людини, але й враховувати візуальний контекст.

Ключові слова: чотириногий робот, робототехніка, голосове управління, взаємодія людина-робот, штучний інтелект, навчання з підкріпленням, розпізнавання мовлення, великі мовні моделі.

R. M. GALAGAN

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation
and Non-Destructive Testing Systems
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0001-7470-8392

A. A. SAKUTA

Master’s Student at the Department of Automation
and Non-Destructive Testing Systems
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0009-0004-5889-0488

A. S. MOMOT

Doctor of Philosophy, Associate Professor,
Senior Lecturer at the Department of Automation
and Non-Destructive Testing Systems
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0001-9092-6699

O. V. MURAVIOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation
and Non-Destructive Testing Systems
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-7699-0245

O. A. POVSHENKO

Doctor of Philosophy, Assistant at the Department of Automation
and Non-Destructive Testing Systems
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0003-2998-5950

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF QUADRUPED ROBOTS WITH VOICE CONTROL FUNCTIONALITY

The current stage of robotics development is characterized by a transition from deterministic specialized systems to intelligent autonomous systems capable of functioning in complex and unpredictable environments. Quadruped mobile robots are particularly noteworthy, combining high stability, passability, and maneuverability, ensuring efficiency where wheeled or tracked mobile platforms lose their performance. At the same time, the development of such systems remains a challenging task that requires improvements in mechanical architecture, optimization of energy consumption, and the introduction of new control algorithms and human-robot interaction systems. The aim of the research is to conduct a comprehensive analysis of the current state of development of quadruped robots and to identify prospects for their improvement. The analysis identified the main trends in the development of the industry: improvement of bionic design solutions, introduction of artificial intelligence technologies (in particular, deep learning with reinforcement) into motion control systems, and development of natural language interaction between humans and robots. Based on the generalization of the data, a conceptual architecture of an intelligent quadruped robot with integrated voice control is proposed, combining modules of artificial intelligence, speech recognition, and computer vision. The practical significance of the work lies in the formation of a generalized model of human-robot interaction capable of providing intuitive control of mobile platforms and increasing the efficiency of their use in complex real-world conditions, in which the robot must not only respond to human voice commands, but also take into account the visual context.

Key words: quadruped robot, robotics, voice control, human-robot interaction, artificial intelligence, reinforcement learning, speech recognition, large language models.

Постановка проблеми

Сучасний розвиток робототехніки демонструє значні досягнення у сфері створення мобільних роботів, проте залишається низка невіршених завдань, що стосуються їх ефективності та універсальності [1]. Колісні та гусеничні платформи, попри простоту конструкції, мають суттєві обмеження при пересуванні по пересіченій місцевості, зокрема на крутих схилах, болотистих, кам'янистих чи засніжених ділянках. Це робить їх малоефективними у тих сферах, де ключовим фактором є високий рівень прохідності.

Вирішенням цієї проблеми з конструкторської точки зору є чотириногі роботи (рис. 1), які здатні адаптуватися до складних умов середовища і водночас є простішими за інші багатонігі аналоги [2]. Конструктивні особливості чотириногих роботів розширюють можливості їхнього використання у промислових завданнях, пошуково-рятувальних операціях, інспекційних і сервісних застосуваннях, а також у повсякденному житті.

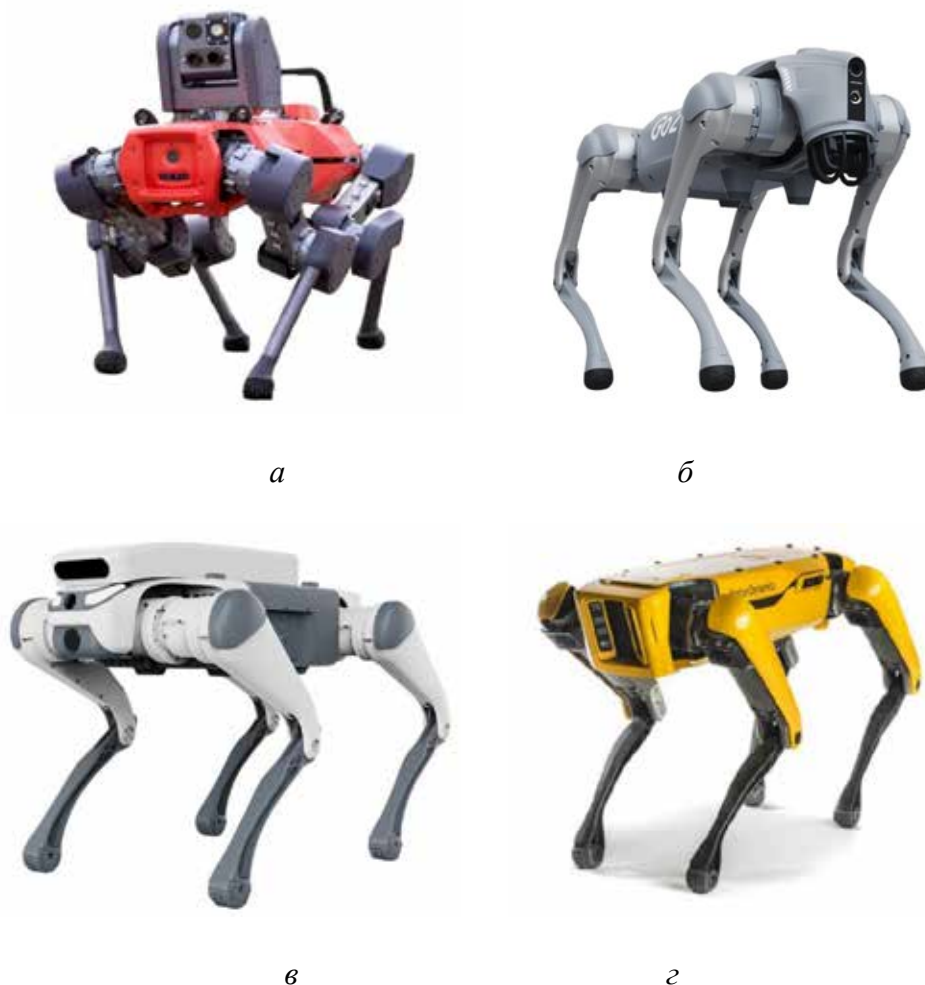


Рис. 1. Приклади чотириногих роботів: *a* – ANYmal ANYbotics Quadruped Robot; *б* – Unitree Go2; *в* – DEEP Robotics Lite 3; *г* – Boston Dynamics Spot

Хоча чотириногі роботи характеризуються високою прохідністю та стійкістю, їхнє широке практичне впровадження обмежується низкою технічних і програмних проблем: складністю механічної архітектури, значним енергоспоживанням, високою вартістю компонентів і потребою в адаптивних алгоритмах керування, здатних працювати у реальному часі [3].

У таблиці 1 наведені переваги та недоліки чотириногих роботів порівняно із дво-, шести-, восьминогими та колісними роботами, а також із біологічними аналогами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останні роки характеризуються стрімким прогресом у сфері створення чотириногих роботів завдяки розвитку технологій штучного інтелекту (ШІ), сенсорики та високопродуктивних обчислювальних систем [4]. Аналіз наукових публікацій дає змогу виокремити чотири завдання, які необхідно вирішувати під час проектування мобільних чотириногих роботів нового покоління:

Таблиця 1

Переваги та недоліки чотириногих роботів

Характеристика	Переваги	Недоліки
Мобільність та прохідність	Висока прохідність (здатність пересуватися пересіченою місцевістю, долати схили, сходи, кам'янисті та нерівні поверхні)	Адаптивність поступається біологічним аналогам (менша гнучкість, швидкість та динаміка порівняно з тваринами)
Стійкість та функціональність	Оптимальний баланс стійкості та вантажопідйомності порівняно з двоногими роботами	Складні алгоритми управління, чутливі до відмови сенсорів або приводів (може призвести до втрати мобільності)
Конструкція та управління	Простіші за конструкцією та управлінням порівняно з шестиногими чи восьминогими роботами	Складна механічна конструкція з великою кількістю приводів, що підвищує масу та вартість порівняно із колісними, гусеничними та двоногими роботами
Економіка та технічне обслуговування	Прийнятний компроміс між простою мобільністю колісних платформ і менш стійкими двоногими	Ускладнене технічне обслуговування та вищі енергетичні витрати порівняно з колісними аналогами, що обмежує їхню автономність

1) розробка та впровадження нових конструктивних рішень, спрямованих на зниження маси, енергоспоживання та підвищення автономності чотириногих платформ без втрати стабільності;

2) розробка методів керування та планування рухів із урахуванням динаміки тіла та нерівностей поверхні;

3) інтеграція інтелектуальних алгоритмів прийняття рішень, які дозволяють роботам самонавчатися, оптимізувати рух і адаптувати свою поведінку до контексту середовища;

4) забезпечення ефективної взаємодії людина–робот (Human-Robot Interaction, HRI) на інтуїтивному рівні з одночасним вирішенням проблеми точності і надійності голосової комунікації.

Зокрема, у роботі [5] проаналізовано історичну еволюцію та ключові технологічні віхи розвитку чотиринової робототехніки, приділено увагу механічній архітектурі, стратегіям управління рівновагою та навігації. Автори підкреслюють, що ефективність таких роботів значною мірою залежить від оптимального розподілу маси та розташування центрів обертання у кінцівках. Сучасні тенденції спрямовані на зменшення маси конструкції та використання легких матеріалів із високою питомою міцністю, що дозволяє підвищити енергоефективність без втрати стійкості.

На основі детального аналізу варіантів дизайну, стратегій керування та алгоритмів планування руху чотириногих роботів автори статті [6] доводять, що збалансована взаємодія між жорсткістю приводів і пасивною еластичністю з'єднань сприяє стабільності руху на нерівних поверхнях.

Дослідження [7] продемонструвало, що використання нейронних мереж дозволяє роботам навчатися нових типів рухів (наприклад, рисі чи галопу), навіть якщо вони не були явно запрограмовані у навчальних даних. Це свідчить про потенціал самоорганізованих систем у плануванні складних траєкторій. Рухові стратегії роботів-антроподів нового покоління, призначених для роботи у складних і змінних ландшафтах, обговорюються у роботі [8], автори якої пропонують алгоритми, що забезпечують компроміс між точністю стабілізації та швидкістю, що є критичним для застосувань у рятувальних операціях та промисловій інспекції.

Аналіз літературних джерел, що наведені вище, а також робіт [9, 10] дозволяє зробити висновок, що чотириногі роботи посідають провідне місце серед мобільних робототехнічних систем завдяки поєднанню високої прохідності, стійкості та відносної конструктивної простоти. Водночас їхнє широке впровадження обмежується високою складністю механічної архітектури, значними енергетичними витратами й потребою у складних алгоритмах управління. Одним із ключових напрямів розвитку є впровадження глибокого навчання з підкріпленням (Deep Reinforcement Learning, DRL), яке дозволяє роботам формувати адаптивні моделі поведінки без ручного налаштування параметрів керування. Інтеграція ШІ в систему прийняття рішень дозволяє поєднати дані з сенсорів, камер і лідарів у єдину когнітивну модель, що визначає оптимальні дії робота залежно від умов середовища.

Паралельно з технічним удосконаленням рухових систем зростає увага до природної взаємодії між людиною і роботом. Інтеграція голосових інтерфейсів розглядається як засіб підвищення інтуїтивності управління, особливо у випадках, коли оператор виконує паралельні завдання. Використання природної мови дозволяє зменшити когнітивне навантаження та підвищити швидкість реакції системи у стресових або динамічних умовах. Водночас залишається низка викликів, пов'язаних із контекстним розпізнаванням команд, шумозахищеністю та багатомовною підтримкою, що визначає подальші напрями розвитку HRI.

Узагальнюючи результати аналізу, можна зазначити, що сучасні дослідження спрямовані на створення інтегрованих систем, які поєднують біонічні принципи конструкції, алгоритми глибокого навчання та природномовну взаємодію. Це формує основу для розроблення чотириногих роботів нового покоління – автономних, енергоефективних і здатних до контекстно-залежної комунікації з людиною.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є комплексний аналіз сучасного стану, тенденцій і перспектив розвитку чотириногих роботів

з акцентом на інтеграцію систем ШІ та голосового управління у процес прийняття рішень і взаємодії людина–робот. Методи дослідження ґрунтуються на аналітичному огляді сучасних публікацій, в яких описані механічні, алгоритмічні та комунікаційні аспекти побудови чотириногих роботів, порівняльному аналізі та систематизації наукових результатів. Особлива увага в роботі приділена обговоренню можливостей голосових технологій, що створюють інтуїтивно зрозумілий канал взаємодії між людиною та роботом у контексті реальних сценаріїв HRI. Також зосереджено увагу на використанні глибокого навчання з підкріпленням для оптимізації руху чотириногих роботів та підвищення їх автономності.

Викладення основного матеріалу дослідження

Принципи реалізації руху чотириногих роботів

Реалізація руху чотириногих роботів базується на біонічних принципах і інженерних рішеннях, що забезпечують баланс між стабільністю, прохідністю та енергоефективністю. Для цього використовуються різні схеми ходи та алгоритми контролю рівноваги – від класичних методів планування рухів до сучасних підходів із використанням ШІ, які дозволяють адаптувати пересування до складних і динамічних умов [3].

Стабільність руху чотириногих роботів у неструктурованих середовищах може бути забезпечена завдяки використанню різних підходів, одним із яких є морфологічна адаптація. У роботі [11] описана реконфігурована конструкція корпусу чотиринового робота, кінцівки якого створені на основі механізму Хокена. Така архітектура дозволяє роботу змінювати положення тіла між вертикальною та низькою позами, виконуючи плавні переходи завдяки вигнутій траєкторії руху кінцівок і плечовим шарнірам, що сприяють активній і пасивній адаптації до рельєфу. Перевагами є підвищена прохідність і стійкість на складному рельєфі за рахунок пасивної/активної підлаштуваності, а недоліками – ускладнення конструкції та керування, а також збільшення маси. Тому перспективним є поєднання морфологічної адаптації з прогнозним керуванням (model predictive control, MPC) для енергоощадних переходів між позами.

Для забезпечення стабільного динамічного пересування чотириногих роботів (зокрема, рисою) може бути застосований метод, що ґрунтується на контролі центроїдального імпульсу [12]. Бажаний рух центру мас генерується на основі моделі лінійного інвертованого маятника. Для обчислення необхідних прискорень шарнірів та сил реакції опори використовується квадратичне програмування, яке мінімізує похибку відстеження бажаної швидкості зміни центроїдального імпульсу, одночасно враховуючи динамічні обмеження та вплив тертя. Висновки свідчать про те, що цей алгоритм є надійним (зокрема, до помилок маси робота) та ефективним для динамічних дій. Перевагами є передбачуваність і формальні гарантії стабілізації. Але варто врахувати і обмеження у вигляді зниження гнучкості у сильно нелінійних або невідомих умовах. Перспективним напрямом розвитку є гібридизація з DRL (наприклад, використання MPC як «захисного» шару).

Для досягнення надійних та динамічних стрибкових рухів чотиринового робота запропоновано використовувати DRL на базі алгоритму Soft-Actor Critic (SAC) [13]. Результатом є розробка єдиного, узагальненого алгоритму зворотного зв'язку, який працює в реальному часі, здатний відстежувати багато різних траєкторій стрибків і успішно переноситься з симуляції в реальність без додаткового налаштування, демонструючи надійні стрибки навіть на нерівній поверхні. Це надає системі високу адаптивність до збурень і невизначеностей, здатність виконувати узагальнення на нові траєкторії. Обмеженням є необхідність у великих обчислювальних витратах на навчання.

У роботі [14] розглядається стратегія руху чотириногих роботів, в основі якої лежать природні переходи, що забезпечує стабільне та енергоефективне пересування на різних місцевостях та швидкостях. Основним методом є створення карти пересування, яка комплексно інтегрує критерії вартості транспортування і стабільності для керування вибором типу руху, подібно до того, як тварини (наприклад, кіт) використовують рись для низької швидкості чи галоп для високої. Реалізація плавного перемикавання між моделями руху досягається за допомогою афінних перетворень для параметрів типів руху та кінцевого автомата, що визначає порядок переходу. Результати експериментів підтверджують, що ця стратегія перевершує базові методи у досягненні одночасно підвищеної ефективності локомоції та її стабільності. Перевагами є енергоощадність і робастність у широкому діапазоні швидкостей. Але існує потреба у ретельному налаштуванні критеріїв переходів. Перспективним варіантом є автоматичний вибір типу ходи на основі політик DRL з урахуванням енергобюджету та ризику ковзання.

Загалом, сучасні підходи до реалізації руху чотириногих роботів поєднують класичні методи динамічного керування з алгоритмами глибокого навчання з підкріпленням, що забезпечує як стабільність, так і адаптивність у складних умовах. Результати досліджень демонструють успішне застосування таких рішень для пересування рисою, подолання сходів і виконання стрибків навіть на нерівних поверхнях. На сьогоднішній день оптимальною є гібридна архітектура, де класичні моделі гарантують безпеку й базову стабілізацію, а ML/DRL-політики відповідають за високорівневе планування, вибір типу ходи та адаптацію до середовища

Інтеграція ШІ в систему прийняття рішень чотириногих роботів

Розвиток сучасної робототехніки критично залежить від інтеграції ШІ, що значно підвищує адаптивність, точність керування та ефективність прийняття рішень роботами у складних і неструктурованих середовищах

[15]. У фокусі – перехід від «реактивних» контролерів до багаторівневих когнітивних систем, які поєднують сприйняття, прогноз і планування.

Беззаперечно, інтеграція технологій ШІ у систему прийняття рішень чотириногих роботів є важливим напрямом їх розвитку. Використання алгоритмів машинного навчання (machine learning, ML) дозволяє підвищити адаптивність до змінних умов, оптимізувати рух по складному рельєфу та покращити інтерпретацію голосових команд у контексті конкретної ситуації. У роботі [16] оцінено поточний прогрес, ключові успіхи та відкриті виклики DRL у реальних роботизованих застосуваннях. DRL демонструє найкращі результати у задачах з високою невизначеністю, але потребує механізмів безпеки та валідації політик.

Огляд [17] зосереджується на застосуванні глибокого навчання з підкріпленням для створення високоефективних контролерів чотириногих роботів, приділяючи особливу увагу систематизації алгоритмів, подоланню розриву між симуляцією та реальними умовами і визначенню перспективних напрямів подальших досліджень. Таким чином, ключовими трендами є ієрархічні політики, рандомізація середовищ, комбінування з традиційними системами в якості проміжного прошарку.

У роботі [18] представлена ієрархічна система навчання з підкріпленням для чотириногих роботів типу ANYmal C, завдяки якій робот може виконувати завдання, пов'язані із маніпулюванням об'єктами у захищених та обмежених середовищах зі стінами. Методика використовує дворівневу систему керування, яка навчається за допомогою алгоритму Proximal Policy Optimization (PPO). Контролер високого рівня визначає бажані лінійну та кутову швидкості тіла на основі загальної мети та покращеної функції винагороди, що включає штрафи за наближення до стін і використовує ключові точки об'єкта для оцінки помилки позиціонування. Контролер низького рівня перетворює ці команди швидкості на команди позиції суглобів. Симуляційні випробування були проведені у фреймворку NVIDIA Isaac Sim і продемонстрували високу точність та енергоефективність. Таким чином, система «швидкості → суглоби» з контекстною винагородою підвищує керованість у тісних просторах.

У дослідженні [19] проаналізовано поєднання конструктивних можливостей чотириногих роботів із методами ШІ та голосового управління. Застосування глибокого навчання з підкріпленням у поєднанні з пропріоцептивним і тактильним зворотним зв'язком дозволило створити «сліпі» моделі руху, здатні підтримувати стабільність у темряві чи запиленому середовищі. Також досліджено інтеграцію хмарних сервісів розпізнавання мовлення (Amazon Alexa, Google Dialogflow, Microsoft LUIS) для інтуїтивної взаємодії з роботом у реальному часі. Експериментальні результати засвідчили високу ефективність DRL для подолання сходів та перешкод, тоді як голосове управління виявило залежність від шумового середовища. Автори визначають перспективним напрямом поєднання стійких алгоритмів руху з удосконаленими мовними моделями для застосувань у рятувальних та інспекційних завданнях. Це підтверджує, що мультимодальність (пропріоцепція + тактильні/аудіо/візуальні канали) є ключем до робастності.

Таким чином, результати останніх досліджень послідовно демонструють трансформаційний вплив ШІ та машинного навчання на робототехніку, підкреслюючи, що для майбутнього розгортання роботів у складних умовах (включаючи маніпуляції та комунікацію) необхідно продовжувати вдосконалювати багаторівневі моделі на базі DRL та інтегрувати і розвивати мовні моделі для HRI.

Принципи реалізації голосового управління чотириногими роботами

Попри значний прогрес у розвитку мобільних робототехнічних систем, зокрема чотириногих роботів, завдання забезпечення ефективної та інтуїтивно зрозумілої взаємодії між людиною і машиною залишається відкритим. Традиційні методи управління (зокрема через пульти або програмні інтерфейси) часто вимагають спеціальної підготовки, що уповільнює реакцію та знижує ефективність застосування у критичних умовах. Одним із перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є впровадження голосового управління, яке забезпечує природний спосіб комунікації з роботом [20]. Водночас впровадження голосових технологій супроводжується серйозними викликами: необхідністю забезпечення високої точності розпізнавання мовлення в умовах шуму та розробкою алгоритмів контекстної інтерпретації команд. Окрім того, реалізація HRI через голосове управління потребує додатково вирішення деяких етичних (зокрема, довіра та впевненість у сприйнятті команд роботом) та практичних підходів до взаємодії людини з роботом [21]. Складність полягає у тому, що одна й та сама команда може мати різне значення залежно від ситуації (наприклад, контексту завдання, положення робота чи стану середовища), що потребує семантичного розуміння, а не лише акустичного розпізнавання.

Роль голосових інтерфейсів у сучасній робототехніці постійно зростає, адже роботи дедалі частіше інтегруються в «людиноцентричні» середовища, утворюючи галузь соціальної робототехніки [22]. Такі системи мають сприймати мову не лише як набір команд, а як інструмент комунікації, що враховує інтонацію, контекст, наміри та навіть емоційні ознаки. Перспективним напрямом є використання відкритих моделей типу Whisper (OpenAI) та wav2vec 2.0 (Meta), які демонструють високу універсальність, можливість донавчання під конкретні мови та стабільну роботу в умовах фонових шумів. Whisper, зокрема, показує середню достовірність понад 95% для коротких команд при належному попередньому очищенні сигналу, що робить його ефективним варіантом для локальних систем HRI [23].

Під час впровадження голосового управління важливим викликом є підвищення точності розпізнавання команд. Наприклад, деякі дослідження показують, що для мов зі складною морфологією, таких як українська, точність розпізнавання залишається нижчою, ніж для англійської [24]. Це означає, що для команд різною мовою ключовим фактором для досягнення необхідної точності є правильно обрана мовна модель.

У роботі [25] розглядається ефективність голосового керування колаборативним роботом DOBOT Magician. Автори використали Arduino-комплект і перевірили 22 оригінальні голосові команди, які були перепрограмовані для виконання рухів робота. Було проведено 2200 симуляцій (100 для кожної команди), результати яких аналізувалися з використанням програми Audacity. Жодна з 22 команд не досягла 100% точності. Результати показали, що команди, які складаються з декількох слів точніше розпізнаються, ніж короткі (однослівні) чи надто довгі. Це свідчить про необхідність оптимізації синтаксису команд і врахування когнітивного навантаження оператора.

Варто зауважити, що правильне розпізнавання команд залежить не тільки від обраної мовної моделі, але й від якості голосових даних, які передаються моделі для розпізнавання. Тому вибір мікрофону, зменшення шумів електронного тракту, вибір способів придушення шумів акустичного тракту також відіграють важливу роль. Зокрема, для попередньої обробки мовного сигналу використовуються мел-частотні кепстральні коефіцієнти (MFCC), що забезпечують виділення стабільних ознак незалежно від акустичних умов [26].

Особливістю розвитку голосової взаємодії між людиною та роботом є те, що розробники не створюють нових мовних моделей та не імплементують їх в апаратне забезпечення робота. Натомість використовуються різноманітні хмарні служби. Наприклад, в роботі [27] для синтезу мовлення використовується сервіс Amazon Polly, а для розпізнавання – Google Cloud Speech-to-Text API. Також авторами розглядається потреба у використанні під час спілкування із роботом команд-активаторів, розпізнавши які робот розумітиме, що далі він отримає вказівки від оператора. Адже оточуюче середовище може генерувати багато шумів, слів сторонніх людей, які не потрібно виконувати, що значно ускладнює процес інтерпретації потрібних вказівок, а не просто будь-чого.

Таким чином, сучасні системи HRI часто не потребують створення власних мовних моделей, оскільки активно використовують готові хмарні рішення, найпоширеніші з яких наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння хмарних сервісів для розпізнавання та синтезу мовлення

Сервіс	Розробник	Переваги	Обмеження
Google Cloud Speech-to-Text	Google	Висока точність для 120+ мов, підтримка потокового режиму	Погіршення результатів при нестабільному інтернеті
Amazon Polly / Lex	Amazon	Суміщення синтезу та діалогових сценаріїв	Менша точність для неанглійських мов
Microsoft Azure Speech	Microsoft	Добра інтеграція з системами керування	Не підтримує навчання користувачьких моделей
Whisper	OpenAI	Висока універсальність, можливість локальної роботи	Високе споживання обчислювальних ресурсів при великих моделях

Наступним етапом розвитку HRI є перехід від командного управління до когнітивної взаємодії, у якій робот не просто виконує інструкцію, а інтерпретує мету користувача. Це можливо завдяки використанню великих мовних моделей (Large Language Models, LLM), які дозволяють перетворювати природномовні вказівки у послідовність оптимальних дій [28]. Такі системи дають змогу оператору спілкуватися з роботом на семантичному рівні без попереднього програмування команд.

Також останні дослідження вказують на важливість у взаємодії людина-робот враховувати не тільки голосове управління, але й візуальний контекст подій та навколишню обстановку. Наприклад, після отримання команди робот може додатково завдяки обробці відеопотоку аналізувати просторову інформацію, виконувати певні дії та генерувати текстовий зворотний зв'язок оператору, забезпечуючи таким чином більш чітке уявлення про поточний стан і наміри робота, що є необхідним для ефективної та безпечної роботи [29]. Поєднання LLM та систем машинного зору (зокрема, тривимірного) дозволяє роботам краще усвідомлювати середовище, інтерпретувати мовні команди в контексті просторових моделей і підвищити автономність [30]. Завдяки візуальному сприйняттю робот паралельно з інтерпретацією голосових команд також може аналізувати жести та позу людини, що надають додаткову інформацію про наміри останньої [31]. Таким чином підвищується обізнаність робота про наміри людини, внаслідок чого покращується взаємодія людина-робот.

Отже, розвиток взаємодії людина-робот на основі голосових команд є одним із важливих напрямів сучасної робототехніки, що безпосередньо залежить від досягнень у сфері великих мовних моделей. Сучасні підходи до голосового управління чотириногими роботами демонструють перехід від окремих систем розпізнавання мовлення до інтегрованих мультимодальних HRI-комплексів, у яких мовна модель, зорове сприйняття та алгоритми ШІ утворюють єдине середовище прийняття рішень.

Для українського контексту найбільш перспективним є використання відкритих моделей типу Whisper з подальшим донавчанням на локальних наборах команд, що дозволить створити адаптивну систему взаємодії людина-робот без залежності від комерційних API.

Перспективним напрямком є реалізація гібридної архітектури «LLM (розуміння наміру) → планувальник (MPC/граф планів) → локальний контролер (DRL)», із чіткими інтерфейсами даних між рівнями та метриками безпеки. У поєднанні з системами комп'ютерного зору це дозволить роботу розпізнавати просторові відносини, аналізувати жести, позу, напрямок погляду користувача та формувати відповідну поведінку.

Концептуальна архітектура чотириноного інтелектуального робота з інтегрованим голосовим управлінням

На основі проведеного аналізу пропонується узагальнена концептуальна архітектура чотириноного інтелектуального робота (рис. 2), яка визначає основні функціональні рівні системи, взаємозв'язки між ними та напрямки подальшого розвитку. Архітектура поєднує модулі сприйняття, інтелектуального аналізу, планування руху та природномовної взаємодії, що забезпечує автономність, адаптивність і когнітивну поведінку робота.

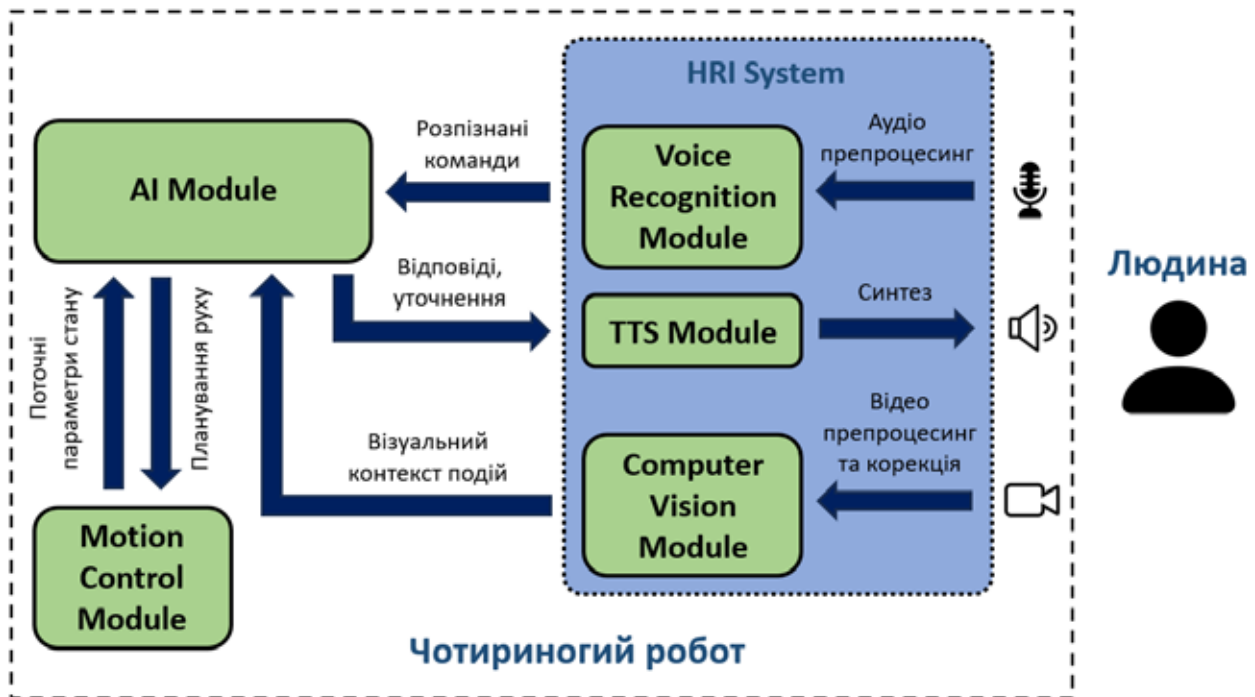


Рис. 2. Концептуальна архітектура чотириноного інтелектуального робота

Центральним компонентом архітектури є HRI System, яка забезпечує двосторонню комунікацію між користувачем і роботом. Система HRI складається із трьох модулів нижнього рівня і призначена для організації взаємодії між людиною та роботом на високому рівні абстракції. Система має забезпечувати не просто розпізнавання роботом команд оператора, але й розуміння запитань, складних вказівок, які визначають набір дій, що необхідно виконати, правильну інтерпретацію намірів оператора. Для цього необхідно впроваджувати адаптивний цикл через LLM, завдяки якому робот навчається уточнювати команди користувача, адаптуючись до стилю мовлення, наголосу чи емоційного стану. Усі модулі HRI System функціонують у єдиному комунікаційному середовищі, що спрощує обмін даними та синхронізацію між компонентами.

Модуль розпізнавання голосу (Voice Recognition Module) відповідає за захоплення, фільтрацію, попередню обробку та перетворення мовного сигналу в текстову форму. Реалізація може базуватись на моделях Whisper (OpenAI), wav2vec 2.0 (Meta), SpeechT5 (Microsoft), Kaldi з подальшим донавчанням під специфіку української мови. Для забезпечення надійності сигналу передбачено попередню обробку з використанням MFCC, шумопригнічення та компенсацію ревербераційних спотворень.

Під час проектування модуля розпізнавання голосу потрібно приділити особливу увагу вибору якісного мікрофону, який забезпечував би високу якість акустичного сигналу (голосу користувача), та впровадженню сучасних методів попередньої обробки сигналів з метою виділення корисних даних з мінімальними спотвореннями.

Повноцінна робота системи HRI ґрунтується на двосторонній комунікації. Це означає, що чотириногий робот має формувати для оператора голосові або текстові відповіді, невербальні сигнали (світлові, рухові тощо). Тому

в систему HRI включено модуль TTS (Text-To-Speech). Зокрема, завдяки цьому модулю робот може уточнити контекст команди (наприклад, уточнити наміри оператора), щоб в подальшому правильно спланувати дії. Модуль забезпечує голосовий зворотний зв'язок від робота до користувача. Використання систем типу Amazon Polly, Google Text-to-Speech або відкритих моделей SpeechT5 / Bark дає змогу роботу підтверджувати дії чи надавати короткі звіти про виконання.

Третім модулем нижнього рівня, який входить до системи HRI, є модуль комп'ютерного зору (Computer Vision Module). Цей модуль реалізує сприйняття просторової сцени за допомогою камер, лідарів та сенсорів глибини. На цьому етапі застосовується обробка зображень, детектування об'єктів (YOLO, Detectron тощо), побудова карти середовища та ідентифікація положення оператора. Отримана візуальна інформація інтегрується із голосовими даними для контекстної інтерпретації команд.

Зібрані від сенсорів та трансформовані модулями нижнього рівня системи HRI дані у заданому форматі передаються у модуль штучного інтелекту (AI Module). Цей модуль виконує роль «когнітивного ядра» системи, у якому відбувається інтерпретація отриманих команд, планування дій і генерація поведінки робота, зокрема:

- інтерпретація текстових команд у контексті поточного стану робота та середовища;
- формування семантичних представлень команд і трансформація їх у цілі;
- планування дій, прийняття рішень, оптимізація траєкторій і поведінки з урахуванням кінематичних, енергетичних та інших обмежень;
- аналіз поточних параметрів стану робота (позиція, швидкість, кутові положення, силові характеристики, контакт із поверхнею тощо), що отримані від модуля керування рухом;
- самонавчання на основі DRL (алгоритми SAC, PPO тощо) та корекція поведінки за результатами взаємодії;
- використання мультимодальних LLM (наприклад, LLaMA 2, Gemma, Mistral) для інтерпретації запитів природною мовою та генерації логічних відповідей.

Таким чином, AI Module реалізує адаптивний цикл «слухати → розуміти → планувати → виконувати → аналізувати», який забезпечує поступове покращення поведінки робота та точності реакції на мовні команди.

На основі аналізу усього масиву даних AI Module формує план руху для модуля керування рухом (Motion Control Module). Він є фізичним рівнем виконання команд. Модуль керування рухом приймає оптимізовані траєкторії або координати, що сформовані модулем ШІ, і перетворює їх у сигнали для виконавчих механізмів.

Основні завдання модуля керування рухом:

- контроль кінематики ніг, планування точок опори та стабілізація центру маси;
- обробка даних інерційних сенсорів (гіроскопи, акселерометри), енкодерів, лідарів;
- реалізація механізмів зворотного зв'язку для адаптації до нерівностей та ковзання;
- реалізація команд від AI Module на рівні виконавчих механізмів (наприклад, сервоприводів з PID) для низькорівневого стабілізування.

Запропонована архітектура інтегрує мовні, зорові та когнітивні підсистеми у єдину платформу. Її особливістю є використання гібридної схеми: нижній рівень забезпечує фізичну стабільність і керування рухом, тоді як верхній рівень реалізує інтелектуальне прийняття рішень на основі ШІ та LLM. Такий підхід формує основу для створення мобільних роботів нового покоління, здатних до природної комунікації, самонавчання та адаптації до змін середовища.

Висновки

Чотириногі роботи демонструють високий потенціал для застосування в рятувальних, промислових та сервісних завданнях, де важливими є прохідність, стійкість і швидке реагування на команди. У результаті проведеного аналізу узагальнено сучасні тенденції розвитку чотириногих роботів та встановлено, що ключовим напрямом еволюції є інтеграція біонічних конструктивних принципів, алгоритмів ШІ та природномовної взаємодії. Такий підхід дозволяє сформулювати новий клас мобільних платформ, здатних до самонавчання, контекстного прийняття рішень і природної комунікації з користувачем.

Запропоновано концептуальну архітектуру інтелектуального чотириноного робота, яка поєднує модулі розпізнавання мовлення, комп'ютерного зору, ШІ та керування рухом. На відміну від існуючих рішень, архітектура забезпечує двосторонню комунікацію людина–робот, здатність до адаптації на основі глибокого навчання з підкріпленням і семантичну інтерпретацію команд за допомогою великих мовних моделей.

Сформована узагальнена модель інтелектуальних HRI-систем, яка є придатною для реалізації в роботах промислового, сервісного та рятувального призначення. Використання відкритих мовних і візуальних моделей дозволяє адаптувати архітектуру для локальних застосувань без потреби у хмарних обчисленнях, що особливо важливо для мобільних і автономних систем.

Серед невирішених завдань залишаються підвищення точності розпізнавання мовлення для української мови, створення стійких до шуму локальних моделей автоматичного розпізнавання мовлення, а також забезпечення безпечного та етичного прийняття рішень роботами у сценаріях спільної роботи з людиною. Необхідною є також подальша розробка методів оцінки довіри до ШІ та запобігання помилкам контекстної інтерпретації команд.

Перспективи подальших досліджень полягають у вдосконаленні інтегрованих мультимодальних систем HRI, які поєднують LLM, DRL і комп'ютерний зір у єдину когнітивну платформу. Синтез цих підходів створить передумови для появи автономних роботів нового покоління, здатних не лише ефективно пересуватись у складному середовищі, а й сприймати, аналізувати та прогнозувати поведінку людини у реальному часі.

Список використаної літератури

1. Raj, R., & Kos, A. (2022). A comprehensive study of mobile robot: History, developments, applications, and future research perspectives. *Applied Sciences*, 12(14), 6951. <https://doi.org/10.3390/app12146951>
2. Biswal, P., & Mohanty, P.K. (2021). Development of quadruped walking robots: A review. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 2017–2031. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.11.005>
3. Fan, Y., Pei, Z., Wang, C., Li, M., Tang, Z., & Liu, Q. (2024). A review of quadruped robots: Structure, control, and autonomous motion. *Advanced Intelligent Systems*, 6(6), 2300783. <https://doi.org/10.1002/aisy.202300783>
4. Kawaharazuka, K., Inoue, S., Suzuki, T., Yuzaki, S., Sawaguchi, S., Okada, K., & Inaba, M. (2024). MEVIUS: A quadruped robot easily constructed through e-commerce with sheet metal welding and machining. *Proceedings of the 2024 IEEE-RAS 23rd International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 631–636. <https://doi.org/10.1109/Humanoids58906.2024.10769853>
5. Li, Q., Cicirelli, F., Vinci, A., Guerrieri, A., Qi, W., & Fortino, G. (2025). Quadruped robots: Bridging mechanical design, control, and applications. *Robotics*, 14(5), 57. <https://doi.org/10.3390/robotics14050057>
6. Azeez, S. A., Mandava, R. K., & Naik, N. S. (2025). A novel review on quadruped robots design variants, gait modulation, and motion planning schemes. *Journal of Field Robotics*, 42(12), 3615–3693. <https://doi.org/10.1002/rob.22575>
7. Yamamoto, H., Kim, S., Ishii, Y., & Ikemoto, Y. (2020). Generalization of movements in quadruped robot locomotion by learning specialized motion data. *Robomech Journal*, 7(29). <https://doi.org/10.1186/s40648-020-00174-1>
8. Saha Kotha, S., Akter, N., Abhi, S. H., Das, S. K., Islam, M. R., Ali, M. F., ... & Hasan, M. M. (2024). Next generation legged robot locomotion: A review on control techniques. *Heliyon*, 10(18), e37237. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37237>
9. Taheri, H., & Mozayani, N. (2023). A study on quadruped mobile robots. *Mechanism and Machine Theory*, 190, 105448. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2023.105448>
10. Chai, H., Li, Y., Song, R., Zhang, G., Zhang, Q., Liu, S., ... & Yang, Z. (2022). A survey of the development of quadruped robots: Joint configuration, dynamic locomotion control method and mobile manipulation approach. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 2(1), 100029. <https://doi.org/10.1016/j.birob.2022.100029>
11. Yuan, J., Wang, S., Wang, B., Shi, R., Wu, X., Li, L., Li, W., Wang, Z., & Dai, Z. (2024). Design of a quadruped robot with morphological adaptation through reconfigurable sprawling structure and method. *Advanced Intelligent Systems*, 6(6), 2300645. <https://doi.org/10.1002/aisy.202300645>
12. Liu, M., Qu, D., Xu, F., Zou, F., Di, P., & Tang, C. (2019). Quadrupedal robots whole-body motion control based on centroidal momentum dynamics. *Applied Sciences*, 9(7), 1335. <https://doi.org/10.3390/app9071335>
13. Bellegarda, G., Nguyen, C., & Nguyen, Q. (2024). Robust quadruped jumping via deep reinforcement learning. *Robotics and Autonomous Systems*, 182, 104799. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2024.104799>
14. Zhang, D., Chen, X., Zhong, Z., Xu, M., Zheng, Z., & Lu, H. (2025). Novel multi-gait strategy for stable and efficient quadruped robot locomotion. *Journal of System Simulation*, 37(1), 2. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.09336>
15. Hussain, M. D., Rahman, M. H., & Ali, N. M. (2024). Artificial intelligence and machine learning enhance robot decision-making adaptability and learning capabilities across various domains. *International Journal of Science and Engineering*, 1(3), 14–27. <https://doi.org/10.62304/ijse.v1i3.161>
16. Tang, C., Abbatematteo, B., Hu, J., Chandra, R., Martín-Martín, R., & Stone, P. (2024). Deep reinforcement learning for robotics: A survey of real-world successes. *arXiv Preprint arXiv:2408.03539*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.03539>
17. Zhang, H., He, L., & Wang, D. (2022). Deep reinforcement learning for real-world quadrupedal locomotion: A comprehensive review. *Intelligent Robotics*, 2(3), 275–297. <https://doi.org/10.20517/ir.2022.20>
18. Azimi, D., & Hoseinnezhad, R. (2025). Hierarchical reinforcement learning for quadrupedal robots: Efficient object manipulation in constrained environments. *Sensors*, 25(5), 1565. <https://doi.org/10.3390/s25051565>
19. Ranasinghe, U., Islam, R., Anavatti, S., & Garrat, M. (2025) A review of reinforcement learning techniques for quadruped robot control and locomotion in complex terrains. *SSRN Preprint*. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5183855>
20. Norda, M., Engel, C., Rennies, J., Appell, J.-E., Lange, S. C., & Hahn, A. (2024). Evaluating the efficiency of voice control as human-machine interface in production. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 21(3), 4817–4828. <https://doi.org/10.1109/TASE.2023.3302951>
21. Han, J., & Conti, D. (2025). Recent advances in human-robot interactions. *Applied Sciences*, 15(12), 6850. <https://doi.org/10.3390/app15126850>

22. Badr, A. A., & Abdul-Hassan, A. K. (2020). A review on voice-based interface for human–robot interaction. *Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering*, 16(2), 1–12. <https://doi.org/10.37917/ijeec.16.2.10>
23. Radford, A., Kim, J.W., Xu, T., Brockman, G., Mcleavey, C. & Sutskever, I. (2023). Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision. *Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning*, PMLR 202:28492–28518. <https://proceedings.mlr.press/v202/radford23a.html>
24. Бронніков, А.І., & Онишко, В.О. (2017). Обробка інформації при голосовому керуванні у робототехніці. *Системи обробки інформації*, 3(149), 85–87.
25. Janiček, M., Ružarovský, R., Velíšek, K., & Holubek, R. (2021). Analysis of voice control of a collaborative robot. *Journal of Physics: Conference Series*, 1781, 012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1781/1/012025>
26. Kishor, I., Mamodiya, U., Saini, S., & Bossoufi, B. (2025). Voice-enabled human–robot interaction: Adaptive self-learning systems for enhanced collaboration. *Robotica*, 43(6), 2143–2171. <https://doi.org/10.1017/S0263574725000438>
27. Mehrizi, K. (2021). Quadrupedal robotic guide dog with vocal human–robot interaction. *arXiv Preprint arXiv:2111.03718*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.03718>
28. Ismail, S., Arbues, A., Cotterell, R., Zurbrügg, R., & Alonso, C. A. (2024). NARRATE: Versatile language architecture for optimal control in robotics. *Proceedings of the 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 9628–9635. <https://doi.org/10.1109/IROS58592.2024.10801425>
29. Abbas, A. N., & Beleznai, C. (2024). TalkWithMachines: Enhancing human–robot interaction through large/vision language models. *Proceedings of the 2024 Eighth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, 253–258. <https://doi.org/10.1109/IRC63610.2024.00039>
30. Mehta, V., Sharma, C., & Thiyagarajan, K. (2025). Large language models and 3D vision for intelligent robotic perception and autonomy. *Sensors*, 25(20), 6394. <https://doi.org/10.3390/s25206394>
31. Lai, Y., Yuan, S., Nassar, Y., Fan, M., Weber, T., & Rättsch, M. (2025). NVP-HRI: Zero shot natural voice and posture-based human–robot interaction via large language model. *Expert Systems with Applications*. 268, 126360. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.126360>

References

1. Raj, R., & Kos, A. (2022). A comprehensive study of mobile robot: History, developments, applications, and future research perspectives. *Applied Sciences*, 12(14), 6951. <https://doi.org/10.3390/app12146951>
2. Biswal, P., & Mohanty, P.K. (2021). Development of quadruped walking robots: A review. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 2017–2031. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.11.005>
3. Fan, Y., Pei, Z., Wang, C., Li, M., Tang, Z., & Liu, Q. (2024). A review of quadruped robots: Structure, control, and autonomous motion. *Advanced Intelligent Systems*, 6(6), 2300783. <https://doi.org/10.1002/aisy.202300783>
4. Kawaharazuka, K., Inoue, S., Suzuki, T., Yuzaki, S., Sawaguchi, S., Okada, K., & Inaba, M. (2024). MEVIUS: A quadruped robot easily constructed through e-commerce with sheet metal welding and machining. *Proceedings of the 2024 IEEE-RAS 23rd International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 631–636. <https://doi.org/10.1109/Humanoids58906.2024.10769853>
5. Li, Q., Cicirelli, F., Vinci, A., Guerrieri, A., Qi, W., & Fortino, G. (2025). Quadruped robots: Bridging mechanical design, control, and applications. *Robotics*, 14(5), 57. <https://doi.org/10.3390/robotics14050057>
6. Azeez, S. A., Mandava, R. K., & Naik, N. S. (2025). A novel review on quadruped robots design variants, gait modulation, and motion planning schemes. *Journal of Field Robotics*, 42(12), 3615–3693. <https://doi.org/10.1002/rob.22575>
7. Yamamoto, H., Kim, S., Ishii, Y., & Ikemoto, Y. (2020). Generalization of movements in quadruped robot locomotion by learning specialized motion data. *Robomech Journal*, 7(29). <https://doi.org/10.1186/s40648-020-00174-1>
8. Saha Kotha, S., Akter, N., Abhi, S. H., Das, S. K., Islam, M. R., Ali, M. F., ... & Hasan, M. M. (2024). Next generation legged robot locomotion: A review on control techniques. *Heliyon*, 10(18), e37237. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37237>
9. Taheri, H., & Mozayani, N. (2023). A study on quadruped mobile robots. *Mechanism and Machine Theory*, 190, 105448. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2023.105448>
10. Chai, H., Li, Y., Song, R., Zhang, G., Zhang, Q., Liu, S., ... & Yang, Z. (2022). A survey of the development of quadruped robots: Joint configuration, dynamic locomotion control method and mobile manipulation approach. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 2(1), 100029. <https://doi.org/10.1016/j.birob.2022.100029>
11. Yuan, J., Wang, S., Wang, B., Shi, R., Wu, X., Li, L., Li, W., Wang, Z., & Dai, Z. (2024). Design of a quadruped robot with morphological adaptation through reconfigurable sprawling structure and method. *Advanced Intelligent Systems*, 6(6), 2300645. <https://doi.org/10.1002/aisy.202300645>
12. Liu, M., Qu, D., Xu, F., Zou, F., Di, P., & Tang, C. (2019). Quadrupedal robots whole-body motion control based on centroidal momentum dynamics. *Applied Sciences*, 9(7), 1335. <https://doi.org/10.3390/app9071335>
13. Bellegarda, G., Nguyen, C., & Nguyen, Q. (2024). Robust quadruped jumping via deep reinforcement learning. *Robotics and Autonomous Systems*, 182, 104799. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2024.104799>

14. Zhang, D., Chen, X., Zhong, Z., Xu, M., Zheng, Z., & Lu, H. (2025). Novel multi-gait strategy for stable and efficient quadruped robot locomotion. *Journal of System Simulation*, 37(1), 2. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.09336>
15. Hussain, M. D., Rahman, M. H., & Ali, N. M. (2024). Artificial intelligence and machine learning enhance robot decision-making adaptability and learning capabilities across various domains. *International Journal of Science and Engineering*, 1(3), 14–27. <https://doi.org/10.62304/ijse.v1i3.161>
16. Tang, C., Abbatematteo, B., Hu, J., Chandra, R., Martín-Martín, R., & Stone, P. (2024). Deep reinforcement learning for robotics: A survey of real-world successes. *arXiv Preprint arXiv:2408.03539*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.03539>
17. Zhang, H., He, L., & Wang, D. (2022). Deep reinforcement learning for real-world quadrupedal locomotion: A comprehensive review. *Intelligent Robotics*, 2(3), 275–297. <https://doi.org/10.20517/ir.2022.20>
18. Azimi, D., & Hoseinnezhad, R. (2025). Hierarchical reinforcement learning for quadrupedal robots: Efficient object manipulation in constrained environments. *Sensors*, 25(5), 1565. <https://doi.org/10.3390/s25051565>
19. Ranasinghe, U., Islam, R., Anavatti, S., & Garrat, M. (2025) A review of reinforcement learning techniques for quadruped robot control and locomotion in complex terrains. *SSRN Preprint*. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5183855>
20. Norda, M., Engel, C., Rennies, J., Appell, J.-E., Lange, S. C., & Hahn, A. (2024). Evaluating the efficiency of voice control as human–machine interface in production. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 21(3), 4817–4828. <https://doi.org/10.1109/TASE.2023.3302951>
21. Han, J., & Conti, D. (2025). Recent advances in human–robot interactions. *Applied Sciences*, 15(12), 6850. <https://doi.org/10.3390/app15126850>
22. Badr, A. A., & Abdul-Hassan, A. K. (2020). A review on voice-based interface for human–robot interaction. *Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering*, 16(2), 1–12. <https://doi.org/10.37917/ijeec.16.2.10>
23. Radford, A., Kim, J.W., Xu, T., Brockman, G., Mclevey, C. & Sutskever, I. (2023). Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision. *Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning*, PMLR 202:28492–28518. <https://proceedings.mlr.press/v202/radford23a.html>
24. Bronnikov, A., & Onyshko, V. (2017). Information processing for speech control in robotics. *Information Processing Systems*, 3(149), 85–87.
25. Janiček, M., Ružarovský, R., Velíšek, K., & Holubek, R. (2021). Analysis of voice control of a collaborative robot. *Journal of Physics: Conference Series*, 1781, 012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1781/1/012025>
26. Kishor, I., Mamodiya, U., Saini, S., & Bossoufi, B. (2025). Voice-enabled human–robot interaction: Adaptive self-learning systems for enhanced collaboration. *Robotica*, 43(6), 2143–2171. <https://doi.org/10.1017/S0263574725000438>
27. Mehrizi, K. (2021). Quadrupedal robotic guide dog with vocal human–robot interaction. *arXiv Preprint arXiv:2111.03718*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.03718>
28. Ismail, S., Arbues, A., Cotterell, R., Zurbrugg, R., & Alonso, C. A. (2024). NARRATE: Versatile language architecture for optimal control in robotics. *Proceedings of the 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 9628–9635. <https://doi.org/10.1109/IROS58592.2024.10801425>
29. Abbas, A. N., & Beleznaï, C. (2024). TalkWithMachines: Enhancing human–robot interaction through large/vision language models. *Proceedings of the 2024 Eighth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, 253–258. <https://doi.org/10.1109/IRC63610.2024.00039>
30. Mehta, V., Sharma, C., & Thiyagarajan, K. (2025). Large language models and 3D vision for intelligent robotic perception and autonomy. *Sensors*, 25(20), 6394. <https://doi.org/10.3390/s25206394>
31. Lai, Y., Yuan, S., Nassar, Y., Fan, M., Weber, T., & Rättsch, M. (2025). NVP-HRI: Zero shot natural voice and posture-based human–robot interaction via large language model. *Expert Systems with Applications*. 268, 126360. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.126360>

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 26.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

Ю. Л. ГУНЬКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри харчових технологій та хімії
Луцький національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-1441-9625

О. О. БАЗИЛЬ

кандидат фізико-математичних наук,
старший викладач кафедри комп'ютерних наук
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0002-2644-5361

М. І. БАРБАШ

старший викладач кафедри архітектури та дизайну
Національний університет «Чернігівська політехніка»
ORCID: 0000-0003-2784-5030

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СТВОРЕННІ ЦИФРОВИХ БЛИЗНЮКІВ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ

Актуальність дослідження зумовлена інтенсифікацією цифровізації інженерних систем та потребою в обґрунтованих технічних і управлінських рішеннях в умовах ускладнення об'єктів, динамічності режимів їхнього функціонування та обмеженості часу на аналіз. За таких умов традиційні підходи до проектування, моніторингу й експлуатації інженерних систем не забезпечують належної адаптивності, що актуалізує необхідність застосування цифрових близнюків як інструмента інтеграції моделей, даних і аналітичних механізмів управління.

Метою статті є наукове узагальнення та обґрунтування значення інформаційних технологій у створенні цифрових близнюків інженерних систем, а також визначення шляхів оптимізації їхнього застосування для аналізу, моніторингу та управління технічними об'єктами протягом усього життєвого циклу.

Методи дослідження охоплюють системний аналіз сучасних інформаційних технологій, логіко-аналітичне узагальнення архітектурних і функціональних підходів до побудови цифрових близнюків, а також порівняльний аналіз практик цифрового моніторингу, прогнозування та оптимізацію інженерних систем.

Результати дослідження. Проаналізовано сучасний стан і тенденції розвитку інформаційних технологій, що застосовуються для створення цифрових близнюків. Узагальнено архітектурні рішення та технологічні компоненти цифрових близнюків із позицій функціональної взаємодії та масштабованості. Досліджено можливості застосування цифрових близнюків у режимі реального часу для моніторингу, прогнозування та оптимізації функціонування інженерних систем. Виявлено основні науково-практичні проблеми їхнього впровадження, пов'язані з якістю даних, точністю моделей, кібербезпекою та інтеграцією з наявною інженерною інфраструктурою. Обґрунтовано доцільність поетапного та модульного підходів до впровадження цифрових близнюків з урахуванням вимог ефективності та надійності.

Висновки. Встановлено, що цифрові близнюки на основі сучасних інформаційних технологій формують прикладну основу адаптивного управління інженерними системами та сприяють підвищенню точності розрахунків і стійкості експлуатаційних рішень. Доведено, що практична ефективність цифрових близнюків визначається архітектурною узгодженістю компонентів, якістю даних і рівнем кіберзахисту.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням методів підвищення стійкості цифрових моделей за неповних і шумних даних, інтеграцією цифрових близнюків з адаптивними алгоритмами аналізу та формуванням уніфікованих підходів до їхнього застосування в складних інженерних системах.

Ключові слова: цифрова трансформація, інженерне моделювання, віртуальні моделі, системна інтеграція, обробка експлуатаційних даних, моніторинг технічного стану, адаптивне управління, прогнозування відмов, життєвий цикл об'єкта.

YU. L. HUNKO

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Food Technology and Chemistry
Lutsk National Technical University
ORCID: 0000-0002-1441-9625

O. O. BAZYL

PhD in Physics and Mathematics,
Senior Lecturer at the Department of Computer Science
Sumy State University
ORCID: 0000-0002-2644-5361

M. I. BARBASH

Senior Lecturer at the Department of Architecture and Design
Chernihiv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0003-2784-5030

INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE DEVELOPMENT OF DIGITAL TWINS FOR ENGINEERING SYSTEMS

The relevance of the research stems from the intensification of digitalization in engineering systems and the need for well-grounded technical and managerial decisions under conditions of increasing system complexity, dynamic operating modes, and limited time for analysis. Under these circumstances, traditional approaches to the design, monitoring, and operation of engineering systems do not provide adequate adaptability, which highlights the importance of using digital twins as a tool for integrating models, data, and analytical control mechanisms.

The purpose of the article is to provide a scholarly synthesis and justification of the role of information technologies in developing digital twins for engineering systems, as well as to identify ways to optimize their application for analysis, monitoring, and control of technical objects throughout the entire life cycle. The research methods include a systematic analysis of modern information technologies, logical and analytical generalization of architectural and functional approaches to building digital twins, and a comparative assessment of practices in digital monitoring, forecasting, and optimization of engineering systems.

Research results. The study analyzes the current state and development trends of information technologies used in the creation of digital twins. Architectural solutions and technological components of digital twins are summarized from the standpoint of functional interaction and scalability. The potential of real-time digital twin applications for monitoring, forecasting, and optimizing the performance of engineering systems is examined. Key scientific and practical challenges associated with data quality, model accuracy, cybersecurity, and integration with existing engineering infrastructure are identified. The feasibility of phased and modular implementation of digital twins is substantiated with regard to requirements of efficiency and reliability.

Conclusions. It is established that digital twins based on modern information technologies form an applied foundation for adaptive management of engineering systems and contribute to improved analytical accuracy and operational resilience. The study demonstrates that the practical effectiveness of digital twins depends on architectural coherence of components, data quality, and the level of cybersecurity. Future research perspectives are linked to the development of methods for enhancing the robustness of digital models under incomplete and noisy data, integrating digital twins with adaptive analytical algorithms, and forming unified approaches to their application in complex engineering systems.

Key words: digital transformation, engineering modeling, virtual models, system integration, operational data processing, technical condition monitoring, adaptive control, failure forecasting, life cycle of an object.

Постановка проблеми

Активна цифровізація інженерних систем у промисловості, енергетиці, будівництві та транспорті зумовлює необхідність переходу від фрагментарного застосування інформаційних технологій до комплексних інтегрованих рішень, здатних забезпечити цілісне відтворення об'єктів упродовж усього життєвого циклу. У цьому контексті концепція цифрових близнюків є особливо актуальною як інструмент, що поєднує комп'ютерне моделювання, сенсорні дані, алгоритми аналізу великих даних і методи штучного інтелекту (далі – ШІ) для динамічного відображення стану й поведінки реальних інженерних систем. Водночас відсутність уніфікованих підходів до створення та інтеграції цифрових близнюків, а також складність забезпечення точності моделей і синхронізації з фізичними об'єктами обмежують практичну ефективність їхнього застосування.

Проблема використання інформаційних технологій у створенні цифрових близнюків тісно пов'язана з важливими науковими та практичними завданнями, зокрема з розвитком методів системного моделювання складних технічних об'єктів, підвищенням точності прогнозування їхнього функціонування та обґрунтуванням управлінських рішень у режимі реального часу. У практичному вимірі це завдання охоплює оптимізацію експлуатаційних

витрат, підвищення надійності та безпеки інженерних систем, зниження ризиків відмов та аварій, а також підтримку процесів модернізації та післякризового відновлення інфраструктури. Таким чином, наукове обґрунтування та методичне забезпечення застосування сучасних інформаційних технологій у створенні цифрових близнюків є необхідною умовою підвищення ефективності управління інженерними системами та реалізації стратегічних завдань інноваційного розвитку в умовах технологічних і структурних трансформацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд сучасних досліджень свідчить про формування чотирьох взаємопов'язаних наукових напрямів, у межах яких послідовно розкривається еволюція цифрових близнюків як складних інформаційно-технологічних систем. Перший напрям пов'язаний із концептуалізацією та методологічним осмисленням цифрових близнюків інженерних систем. У своїй праці Р. Сакс (R. Sacks) та співавтори визначають цифровий близнюк як даноорієнтовану інформаційну систему, що інтегрує проєктні, експлуатаційні та сенсорні дані протягом життєвого циклу інженерних об'єктів [1]. Сучасні підходи до визначення цифрових близнюків систематизують М. Г. Хуарес (M. G. Juarez) та співавтори, які акцентують на методологічних викликах синхронізації фізичних і віртуальних компонентів [2]. С. Міхай (S. Mihai) та співавтори аналізують цифрові близнюки крізь призму сукупності основних інформаційних технологій, зокрема інтернету речей, великих даних, ШІ та хмарних обчислень, що створює цілісне уявлення про їхню технологічну основу [3]. Роль математичного моделювання та симуляцію в реальному часі як важливого елемента функціонування цифрових близнюків інженерної динаміки підкреслюють Д. Дж. Вагг (D. J. Wagg) та співавтори [4].

Другий напрям охоплює архітектурні рішення та інформаційні технології реалізації цифрових близнюків. Так, Л. Каптосв (L. Kaptosv) демонструє потенціал використання RESTful API, TypeScript і Laravel для створення масштабованих геоінформаційних платформ, придатних для інтеграції з цифровими близнюками інженерних систем [5]. Концепцію системно-інформаційних моделей цифрових близнюків розвивають М. Корабльов (M. Korablyov) та співавтори, підкреслюючи визначальну роль структурованої моделі даних і формалізованої взаємодії між підсистемами [6]. Питання інформаційної сумісності та візуальної аналітики складних інженерних об'єктів вивчають В. Ван (W. Wang) та співавтори. Вони аналізують інтеграцію BIM-інформації й VR-моделей у цифрові близнюки в контексті Industry 5.0 [7]. Р. Аль-Сехраві (R. Al-Sehrawy) та Б. Кумар (B. Kumar) систематизують архітектурні підходи до впровадження цифрових близнюків у сфері архітектури, інженерії та будівництва, наголошуючи на необхідності стандартизації програмно-інформаційних рішень [8].

Третій напрям зосереджений на практичній реалізації цифрових близнюків для аналізу, моніторингу та оптимізації інженерних систем. Г. Рижакова (G. Ryzhakova) та співавтори доводять ефективність використання інформаційної системи цифрового близнюка (digital twin information system) у проєктному менеджменті будівництва, акцентуючи на інтеграції інформаційних потоків і управлінні ресурсами [9]. Потенціал цифрових близнюків у системній інженерії охорони здоров'я, де IT-рішення уможливають моделювання складних інженерно-організаційних процесів, демонструють Н. Мохамед (N. Mohamed) та співавтори [10]. Концепцію когнітивних цифрових близнюків для розумних міст, яка ґрунтується на персоналізованій обробці даних та прогнозуванні функціонування інженерних інфраструктур, презентують Дж. Ду (J. Du) та співавтори [11]. Практичну реалізацію цифрових близнюків через методи системної інженерії (model-based systems engineering) досліджують Дж. Бікфорд (J. Bickford) та співавтори, наголошуючи на значущості формалізованих моделей для практичного впровадження IT-рішень [12].

Четвертий напрям сфокусований на проблемах інформаційної безпеки, якості даних та управлінської інтеграції цифрових близнюків. У дослідженні І. Р. Опірського та співавторів проаналізовано технічні аспекти шифрування даних у мобільних середовищах Android, які мають важливе значення для захисту інформації цифрових близнюків [13]. С. Поперегняк (S. Poperehnyak) та співавтори вивчають застосування сенсорних джерел ентропії для підвищення криптографічної стійкості інформаційних систем, релевантних для цифрових платформ інженерних систем [14]. Цифровий близнюк як елемент концепції системи систем (system-of-systems) розглядають М. Дітц (M. Dietz) та Г. Пернул (G. Pernul), акцентуючи на управлінні інформаційною взаємодією між гетерогенними підсистемами [15].

Попри активний розвиток досліджень у сфері цифрових близнюків інженерних систем, наукові праці містять низку нерозв'язаних проблем. Зокрема, не сформовано комплексного підходу до узгодженого застосування інформаційних технологій протягом усього життєвого циклу інженерних систем; недостатньо опрацьовано питання архітектурної масштабованості та функціональної взаємодії компонентів цифрових близнюків; фрагментарним є дослідження їхнього застосування в режимі реального часу; обмежено висвітлено вплив основних чинників, зокрема якості даних, точності моделей, кібербезпеки та інтеграції з наявною інфраструктурою на практичну ефективність цифрових рішень.

Запропоноване дослідження спрямоване на заповнення цих прогалів шляхом системного аналізу сучасних інформаційних технологій, узагальнення архітектурних і функціональних підходів до створення цифрових близнюків, дослідження можливостей їхнього застосування для моніторингу, прогнозування та оптимізації інженерних

систем, а також обґрунтування практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності та надійності їхнього впровадження.

Формулювання мети дослідження

Мета статті – науково обґрунтувати роль і можливості інформаційних технологій у створенні цифрових близнюків інженерних систем, а також визначити шляхи підвищення ефективності їхнього застосування для моделювання, моніторингу й управління технічними об’єктами протягом усього життєвого циклу.

Для досягнення цієї мети необхідно розв’язати такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан та основні напрями розвитку інформаційних технологій та архітектурних підходів до створення цифрових близнюків інженерних систем.
2. Дослідити потенціал застосування цифрових близнюків для моніторингу, прогнозування й оптимізації роботи інженерних систем у режимі реального часу.
3. Визначити основні науково-практичні проблеми впровадження цифрових близнюків та обґрунтувати шляхи підвищення ефективності та надійності їхнього застосування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Сучасний розвиток інформаційних технологій у сфері створення цифрових близнюків інженерних систем характеризується переходом від окремих програмних інструментів до комплексних цифрових платформ, що інтегрують моделі, експлуатаційні дані та аналітичні механізми. Цифровий близнюк є динамічною віртуальною репрезентацією інженерного об’єкта, яка безперервно синхронізується з його фізичним прототипом на основі даних сенсорного моніторингу та автоматизованих систем управління. До основних тенденцій належать хмарні обчислення, що забезпечують масштабованість, впровадження методів аналітики великих даних і машинного навчання для прогнозування станів систем, а також розвиток міжплатформної інтеграції, що забезпечує сумісність різнорідних технічних і програмних компонентів (табл. 1).

Таблиця 1

Інформаційні технології у створенні цифрових близнюків інженерних систем

Інформаційна технологія	Функціональна роль у цифровому близнюку	Приклад застосування
Сенсорні мережі та інтернет речей	Забезпечення безперервного збору експлуатаційних даних	Контроль температури, тиску та вібрацій обладнання
Комп’ютерне та імітаційне моделювання	Відтворення фізичних, динамічних і технологічних процесів	Перевірка режимів навантаження інженерних систем
Хмарні та гібридні обчислення	Обробка, зберігання й масштабування даних і моделей	Централізоване управління цифровими близнюками
Аналітика великих даних і машинне навчання	Прогнозування, виявлення аномалій та оптимізація процесів	Прогноз відмов і планування технічного обслуговування
Платформи інтеграції та інтерфейси програмних застосунків (Application Programming Interface, API)	Узгодження різнорідних інформаційних джерел	Створення єдиного цифрового інформаційного простору

Джерело: сформовано на основі [3, р. 2261; 1; 2; 7; 12, р. 728–729]

Застосування інформаційних технологій у створенні цифрових близнюків інженерних систем ґрунтується на поєднанні інструментів збору експлуатаційних даних, обчислювального моделювання та алгоритмів аналітичної обробки для розв’язання складних інженерних задач. Цифровий близнюк є інженерною моделлю, яка забезпечує аналіз технічного стану, перевірку робочих режимів і обґрунтування управлінських рішень на основі фактичних параметрів функціонування системи. ІТ-рішення уможливають оперативне оновлення моделей відповідно до змін експлуатаційних умов, що підвищує точність інженерних розрахунків і мінімізує невизначеність під час ухвалення рішень. У промислових та енергетичних системах практична реалізація цифрових близнюків ґрунтується на використанні даних сенсорного моніторингу для калібрування математичних і імітаційних моделей обладнання [3, р. 2261]. Такий підхід доцільний для визначення граничних режимів роботи, визначення зносу окремих елементів та прогнозування відмов на основі аналізу динаміки параметрів (температури, тиску, вібрацій і навантажень). Це дає змогу інженерним службам перейти від регламентного технічного обслуговування до станорієнтованого, що знижує експлуатаційні витрати та істотно підвищує надійність систем.

У будівництві та інфраструктурних проєктах цифрові близнюки застосовуються для аналізу напружено-деформованого стану конструкцій, визначення впливу експлуатаційних і середовищних чинників та перевірки ефективності проєктних і реконструктивних рішень [7]. Інтеграція розрахункових моделей із фактичними даними обстежень дає змогу уточнити граничні показники безпеки та визначити пріоритети ремонтних робіт. У транспортних і комунальних системах цифрові близнюки слугують для прогнозування навантажень, оптимізації робочих режимів та аналізу сценаріїв аварійних ситуацій. Отже, інформаційні технології в межах цифрових близнюків

інженерних систем реалізують основну прикладну інженерну функцію, спрямовану на підвищення точності розрахунків, надійності експлуатації та оптимізацію управління технічними об'єктами, що підтверджує їхню визначальну роль у сучасній інженерній практиці.

Архітектурні рішення цифрових близнюків інженерних систем спрямовані на забезпечення узгодженої роботи обчислювальних моделей, аналітичних механізмів і засобів управління у єдиному цифровому просторі. За сучасних умов важливим є перехід до модульних і масштабованих архітектур, що дають змогу поєднувати моделі різної деталізації, адаптувати обчислювальні ресурси до складності об'єкта та забезпечувати розширення функціональності без перебудови всієї системи (табл. 2).

Таблиця 2

Архітектурні компоненти цифрових близнюків та їхня роль у функціональній взаємодії

Компонент архітектури	Основне призначення	Практична функція
Рівень даних	Формування узгоджених наборів експлуатаційних і проєктних даних	Забезпечення актуальності розрахунків
Обчислювальне ядро	Реалізація математичних та імітаційних моделей	Аналіз режимів і сценаріїв роботи
Аналітичні модулі	Обробка результатів і формування інженерних висновків	Підтримка рішень і прогнозування
Інтеграційний контур	Обмін інформацією із зовнішніми системами	Узгодження локальних і системних рішень
Користувачський інтерфейс	Представлення результатів і керування моделями	Інженерний і управлінський контроль

Джерело: сформовано на основі [6, р.104; 15, р.180–181; 8, р. 926; 12, р.731]

У проєктуванні та експлуатації інженерних систем архітектура цифрового близнюка визначає його здатність функціонувати як універсальний інструмент інженерного аналізу, а не лише засіб візуалізації. Модульність архітектури сприяє автономній роботі обчислювального ядра та аналітичних підсистем, що має вирішальне значення для застосування цифрових близнюків на всіх фазах життєвого циклу інженерного об'єкта: від проєктування до експлуатації та модернізації. Це дає змогу уточнювати розрахункові моделі без зупинення системи та без втрати узгодженості результатів. У промисловій практиці ця архітектура уможливує паралельне використання детальних моделей критичних вузлів зі спрощеними агрегованими моделями на системному рівні [6, р. 104]. Такий підхід дає змогу оцінити вплив змін режимів роботи окремих елементів на загальну ефективність виробничого процесу. В інфраструктурних і будівельних системах інтеграція обчислювального ядра з аналітичними модулями дає змогу зіставляти проєктні розрахунки з фактичними показниками експлуатації, що є основою для контролю запасів міцності, аналізу деформацій та планування ремонтних заходів [12, р. 731]. Інтеграційний контур архітектури гарантує практичне впровадження цифрових близнюків як елемента складніших управлінських систем, зокрема диспетчеризації, управління активами та технічного обслуговування. У транспортних і міських інженерних системах це дає змогу об'єднувати локальні цифрові близнюки окремих об'єктів у єдиний цифровий простір для здійснення сценарного аналізу навантажень, відмов і аварійних ситуацій. Отже, архітектура цифрових близнюків безпосередньо формує їхню практичну значущість як інструмента технічного аналізу, прогнозування та обґрунтування інженерних і управлінських рішень у сучасних умовах.

Застосування цифрових близнюків у режимі реального часу спрямоване на розв'язання прикладних інженерних завдань, пов'язаних із контролем поточного стану, прогнозуванням динаміки параметрів і оптимізацією режимів функціонування складних технічних систем. На відміну від статичних чи періодично оновлюваних моделей, цифрові близнюки реального часу забезпечують безперервне коригування розрахункових параметрів на основі оперативних даних, отриманих під час експлуатації. Це дає змогу своєчасно виявляти критичні відхилення, оцінювати вплив управлінських рішень до їхньої практичної реалізації та адаптації режимів роботи інженерних систем до змінних умов без втрати стабільності (табл. 3).

Таблиця 3

Функціональні можливості цифрових близнюків у режимі реального часу

Функціональна функція	Інженерне призначення	Результат застосування
Оперативний моніторинг	Контроль поточного технічного стану	Своєчасне виявлення відхилень
Прогнозування станів	Оцінка динаміки параметрів у часі	Запобігання відмовам
Оптимізація режимів	Підбір ефективних параметрів роботи	Зниження втрат і витрат
Сценарний аналіз	Перевірка альтернативних управлінських рішень	Обґрунтування вибору дій
Адаптація управління	Коригування режимів у режимі реального часу	Підвищення стійкості систем

Джерело: сформовано на основі [4; 9, р. 21; 10, р. 69845; 11]

Упровадження цифрових близнюків у режимі реального часу здійснюється через інтеграцію обчислювальних моделей з потоковими експлуатаційними даними, що забезпечує безперервний аналіз роботи інженерної системи. Такий підхід забезпечує перехід від постфактум-аналізу до постійного моніторингу просторово-часової динаміки параметрів, зокрема навантажень, температурних і вібраційних характеристик, енергоспоживання та пропускної здатності. Актуалізація моделей у реальному часі збільшує їхню прогностичну точність і створює основу для перевірки управлінських дій до їхньої фізичної реалізації.

Для складних виробничих комплексів цифрові близнюки застосовуються для узгодження локальної оптимізації окремих процесів із забезпеченням глобальної ефективності системи [4]. На рівні обладнання вони дають змогу оцінити допустимі режими роботи з урахуванням фактичного технічного стану, тоді як на системному рівні – проаналізувати наслідки перерозподілу навантажень чи зміни технологічних параметрів. В енергетичних і комунальних мережах прогностичні можливості цифрових близнюків застосовуються для нівелювання пікових навантажень, аналізу стійкості системи та мінімізації втрат ресурсів шляхом адаптивного керування.

У транспортних, інфраструктурних і інженерно-будівельних системах цифрові близнюки реального часу забезпечують підтримку оперативних рішень у ситуаціях із підвищеною невизначеністю. Сценарне моделювання потенційних збоїв, перевантажень або аварійних режимів дає змогу визначати найефективніші стратегії реагування та мінімізувати технічні й економічні наслідки порушень [10, р. 69847]. Таким чином, застосування цифрових близнюків для моніторингу, прогнозування та оптимізації в реальному часі створює передумови для переходу до адаптивного управління інженерними системами, спрямованого на зростання їхньої надійності, стійкості та ресурсної ефективності.

Упровадження цифрових близнюків інженерних систем супроводжується комплексом науково-практичних викликів, які обмежують їхню надійність, масштабованість і прикладну цінність у реальних умовах експлуатації. Однією з основних проблем є якість і репрезентативність експлуатаційних даних, необхідних для створення та актуалізації моделей. Нерівномірне надходження даних, наявність пропусків, шумів і систематичних похибок сенсорних вимірювань негативно впливають на коректність калібрування цифрових близнюків і можуть призводити до викривлення результатів прогнозування та оптимізації режимів роботи інженерних систем [3, р. 2262]. Іншим важливим викликом є обмежена точність цифрових моделей, що виникає через спрощення фізичних, технологічних або структурних процесів для зниження обчислювальної складності. У складних інженерних системах із нелінійною динамікою та множинними взаємозв'язками навіть незначні модельні допущення можуть призводити до накопичення похибок у довгострокових прогнозах, що підриває довіру до цифрових близнюків як інструмента підтримки управлінських рішень і ускладнює верифікацію та валідацію моделей в умовах нестабільної експлуатації [4]. Окрема група проблем стосується гарантування кібербезпеки цифрових близнюків, які функціонують в умовах інтенсивного обміну даними та глибокої інтеграції із зовнішніми інформаційними системами. Уразливість каналів передавання інформації, можливість несанкціонованого доступу та ризики маніпуляції даними й моделями становлять додаткові загрози для безпеки інженерних систем, особливо для критичної інфраструктури, що вимагає поєднання інженерних та криптографічних підходів до захисту цифрових платформ [13, с. 222].

Значні труднощі виникають під час інтеграції цифрових близнюків із наявною інженерною інфраструктурою, яка часто ґрунтується на застарілих технічних рішеннях та несумісних форматах даних. Відсутність єдиних стандартів опису моделей, інтерфейсів обміну та протоколів взаємодії ускладнює масштабування цифрових близнюків і їхнє застосування на рівні складних інженерних комплексів. Усі зазначені проблеми свідчать про необхідність подальших наукових досліджень і методичних розробок, спрямованих на підвищення об'єктивності, безпеки та практичної значущості цифрових близнюків у сучасних інженерних системах.

Оптимізацію застосування інформаційних технологій під час створення та використання цифрових близнюків інженерних систем доцільно зосередити на забезпечення їхньої прикладної ефективності, надійності та довгострокової експлуатаційної стійкості. Основним практичним орієнтиром є поетапне впровадження цифрових близнюків із чітким окресленням інженерних завдань, які вони мають розв'язувати на кожному етапі життєвого циклу системи, що дає змогу уникнути надмірної складності моделей та гарантувати відповідність витрат отриманим результатам. Зростання ефективності цифрових близнюків вимагає системного підходу до управління даними, зокрема впровадження процедур контролю якості, уніфікації форматів і синхронізації часових параметрів. Практично доцільним є комбінування детальних моделей критичних елементів інженерних систем зі спрощеними представленими допоміжними процесів, що мінімізує обчислювальне навантаження без шкоди для об'єктивності результатів. Важливою рекомендацією є регулярна верифікація та оновлення моделей на основі фактичних експлуатаційних показників, що збільшує їхню прогностичну цінність та прикладну надійність. Гарантування надійності застосування цифрових близнюків потребує інтеграції технічних і організаційних заходів із кібербезпеки, зокрема сегментації доступу до моделей, захисту каналів передачі даних і моніторингу змін у цифрових середовищах. Це особливо актуально для важливих інженерних систем, де цифрові близнюки безпосередньо впливають на управлінські та експлуатаційні рішення. Рекомендовано також використання модульних

і масштабованих архітектур, які дають змогу адаптувати функціональність цифрового близнюка до змін вимог та умов експлуатації без втрати системної цілісності. Отже, застосування інформаційних технологій у створенні й експлуатації цифрових близнюків має бути спрямоване на досягнення балансу між точністю моделей, обсягами оброблюваних даних та рівнем управлінської корисності, що гарантує ефективне та надійне використання цифрових близнюків як інструмента сучасної інженерної діяльності.

Висновки

Встановлено, що інформаційні технології уможливають створення цифрових близнюків інженерних систем як інтегрованого інструмента моніторингу, прогнозування та оптимізації їхньої роботи протягом життєвого циклу. Обґрунтовано, що практична цінність цифрових близнюків залежить від узгодженості архітектурних рішень, масштабованості моделей і можливості адаптації до змінних умов експлуатації, що підвищує обґрунтованість інженерних і управлінських рішень.

Визначено, що основними викликами впровадження цифрових близнюків є обмежена якість і повнота експлуатаційних даних, необхідність компромісу між точністю моделей та обчислювальною складністю, проблеми верифікації результатів, підвищені вимоги до кібербезпеки та труднощі інтеграції з наявною інженерною інфраструктурою. Обґрунтовано, що ігнорування цих чинників знижує надійність цифрових близнюків і обмежує їхнє практичне застосування.

Запропоновано орієнтувати застосування інформаційних технологій під час створення цифрових близнюків на поетапне впровадження, регулярну верифікацію моделей на основі фактичних даних, використання модульних масштабованих архітектур та комплексне застосування технічних та організаційних заходів кіберзахисту. Перспективи подальших досліджень пов'язані з підвищенням стійкості цифрових моделей в умовах неповних даних, інтеграцією цифрових близнюків з адаптивними алгоритмами аналізу та формуванням уніфікованих підходів до їхнього застосування в інженерних системах.

Список використаної літератури

1. Sacks R., Brilakis I., Pikas E., Xie H. S., Girolami M. Construction with digital twin information systems. *Data-Centric Engineering*. 2020. Vol. 1. Article e14. DOI: <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>
2. Juarez M. G., Botti V. J., Giret A. S. Digital twins: Review and challenges. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2021. Vol. 21, № 3. Article 030802. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4050244>
3. Mihai S., Yaqoob M., Hung D. V., Davis W., Towakel P., Raza M., Nguyen H. X. Digital twins: A survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022. Vol. 24, № 4. P. 2255–2291. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3208773>
4. Wagg D. J., Worden K., Barthorpe R. J., Gardner P. Digital twins: State-of-the-art and future directions for modeling and simulation in engineering dynamics applications. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 6, № 3. Article 030901. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4046739>
5. Kaptsov L. RESTful API Design for Geospatial Logistics Platforms Using Type Script and Laravel. *Journal of Information, Technology and Policy*. 2025. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.62836/jitp.2025.515>
6. Korablyov M., Lutskey S., Ivanisenko I., Fomichov O. System-Information Models of Digital Twins. У: *Proceedings of the International Conference on WorldS4*. 2023. Singapore: Springer Nature Singapore. P. 101–109. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-8031-4_10
7. Wang W., Guo H., Li X., Tang S., Li Y., Xie L., Lv Z. BIM information integration based VR modeling in digital twins in Industry 5.0. *Journal of Industrial Information Integration*. 2022. Vol. 28. Article 100351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100351>
8. Al-Schrawy R., Kumar B. Digital twins in architecture, engineering, construction and operations: A brief review and analysis. У: *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*. 2020. Cham: Springer International Publishing. P. 924–939. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_64
9. Ryzhakova G., Malykhina O., Pokolenko V., Rubtsova O., Homenko O., Nesterenko I., Honcharenko T. Construction project management with digital twin information system. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2022. Vol. 12, № 10. P. 19–28. DOI: https://doi.org/10.46338/ijetae1022_03
10. Mohamed N., Al-Jaroodi J., Jawhar I., Kesserwan N. Leveraging digital twins for healthcare systems engineering. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 69841–69853. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3292119>
11. Du J., Zhu Q., Shi Y., Wang Q., Lin Y., Zhao D. Cognition digital twins for personalized information systems of smart cities: Proof of concept. *Journal of Management in Engineering*. 2020. Vol. 36, № 2. Article 04019052. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000740](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000740)
12. Bickford J., Van Bossuyt D. L., Beery P., Pollman A. Operationalizing digital twins through model-based systems engineering methods. *Systems Engineering*. 2020. Vol. 23, № 6. P. 724–750. DOI: <https://doi.org/10.1002/sys.21559>

13. Опірський І. Р., Хохлячова 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. Poperehnyak S., Syvachenko I., Shevchuk Y. Enhancing pseudorandom number generation using environmental sensor-based entropy sources. *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems (CPITS 2025): Proceedings of the Workshop*. 2025. Vol. 3991. P. 363–380. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3991/paper26.pdf> (date of access: 06.12.2025).

15. Dietz M., Pernul G. Digital Twin: Empowering Enterprises Towards a System-of-Systems Approach. *Business & Information Systems Engineering*. 2020. Vol. 62, № 2. P. 179–184. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12599-019-00624-0>

References

1. Sacks R., Brilakis I., Pikas E., Xie H. S., Girolami M. (2020) Construction with digital twin information systems. *Data-Centric Engineering*, vol. 1, article e14. <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>

2. Juarez M. G., Botti V. J., Giret A. S. (2021) Digital twins: Review and challenges. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 21, no. 3, article 030802. <https://doi.org/10.1115/1.4050244>

3. Mihai S., Yaqoob M., Hung D. V., Davis W., Towakel P., Raza M., Nguyen H. X. (2022) Digital twins: A survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 4, pp. 2255–2291. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3208773>

4. Wagg D. J., Worden K., Barthorpe R. J., Gardner P. (2020) Digital twins: State-of-the-art and future directions for modeling and simulation in engineering dynamics applications. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, vol. 6, no. 3, article 030901. <https://doi.org/10.1115/1.4046739>

5. Kaptosv L. (2025) RESTful API Design for Geospatial Logistics Platforms Using Type Script and Laravel. *Journal of Information, Technology and Policy*, pp. 1–13. <https://doi.org/10.62836/jitp.2025.515>

6. Korablyov M., Lutskyy S., Ivanisenko I., Fomichov O. (2023) System-Information Models of Digital Twins. In *Proceedings of the International Conference on WorldS4* (pp. 101–109). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8031-4_10

7. Wang W., Guo H., Li X., Tang S., Li Y., Xie L., Lv Z. (2022) BIM information integration based VR modeling in digital twins in Industry 5.0. *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 28, article 100351. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100351>

8. Al-Schrawy R., Kumar B. (2020) Digital twins in architecture, engineering, construction and operations: A brief review and analysis. In *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering* (pp. 924–939). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_64

9. Ryzhakova G., Malykhina O., Pokolenko V., Rubtsova O., Homenko O., Nesterenko I., Honcharenko T. (2022) Construction project management with digital twin information system. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 12, no. 10, pp. 19–28. https://doi.org/10.46338/ijetae1022_03

10. Mohamed N., Al-Jaroodi J., Jawhar I., Kesserwan N. (2023) Leveraging digital twins for healthcare systems engineering. *IEEE Access*, vol. 11, pp. 69841–69853. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3292119>

11. Du J., Zhu Q., Shi Y., Wang Q., Lin Y., Zhao D. (2020) Cognition digital twins for personalized information systems of smart cities: Proof of concept. *Journal of Management in Engineering*, vol. 36, no. 2, article 04019052. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000740](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000740)

12. Bickford J., Van Bossuyt D. L., Beery P., Pollman A. (2020) Operationalizing digital twins through model-based systems engineering methods. *Systems Engineering*, vol. 23, no. 6, pp. 724–750. <https://doi.org/10.1002/sys.21559>

13. Opirskiy I. R., Khokhlachova 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*, vol. 1, no. 61, pp. 219–228. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2025.016526> [in Ukrainian]

14. Poperehnyak S., Syvachenko I., Shevchuk Y. (2025) Enhancing pseudorandom number generation using environmental sensor-based entropy sources. In *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems (CPITS 2025): Proceedings of the Workshop* (Vol. 3991, pp. 363–380). Available at: <https://ceur-ws.org/Vol-3991/paper26.pdf> (date of access: 06.12.2025)

15. Dietz M., Pernul G. (2020) Digital Twin: Empowering Enterprises Towards a System-of-Systems Approach. *Business & Information Systems Engineering*, vol. 62, no. 2, pp. 179–184. <https://doi.org/10.1007/s12599-019-00624-0>

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

В. І. ДРОМЕНКО

аспірант кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0009-0007-2957-6969

В. І. ЧУПРИНКА

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0001-7134-8387

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТРИВИМІРНОГО ПРОЄКТУВАННЯ РУКАВИЧОК

Актуальність дослідження зумовлено зростанням вимог до високоточного тривимірного проєктування рукавичок, необхідністю адекватного відтворення складної морфології кисті та її біомеханічної поведінки під час руху, що потребує впровадження новітніх математичних і числових методів моделювання, які здатні забезпечити адаптивність і прогнозованість цифрових прототипів.

Метою статті є наукове обґрунтування використання математичних методів моделювання для підвищення точності 3D-проєктування рукавичок шляхом узгодженого врахування анатомічних параметрів кисті, властивостей матеріалів та особливостей рухів пальців. У роботі застосовано методи числового прогнозування локальних деформацій, аналізу механічних властивостей еластомерів та побудови цифрових біомеханічних моделей системи «кисть–рукавичка». Використано прийоми порівняльного аналізу, цифрової реконструкції та концепцію інтегрованого параметричного проєктування.

Встановлено, що точність цифрових моделей значною мірою залежить від якості синхронізації геометричних, матеріальних та кінематичних параметрів. Доведено ефективність поєднання статичної та динамічної антропометрії для формування адаптивної геометрії рукавичок. Виявлено головні проблеми реконструкції мікрогеометрії міжфалангових зон, моделювання комбінованих деформацій та узгодження нелінійних властивостей матеріалів із цифровою формою. Узагальнено, що застосування комплексних математичних методів дозволяє зменшити похибки в моделюванні, оптимізувати товщину та жорсткість матеріалу, забезпечити стабільну посадку виробу та підвищити його функціональну надійність у різних сферах застосування.

Перспективи подальших досліджень вбачаються у вдосконаленні моделей поведінки м'яких тканин у динаміці, розширенні бази антропометричних даних, розробленні мультифізичних симуляцій для моделювання теплових і контактних ефектів, а також у створенні стандартизованих цифрових протоколів віртуального випробування рукавичок наступного покоління.

Ключові слова: біомеханічне моделювання, кінематика кисті, скінченно-елементний аналіз, параметрична реконструкція, антропометричні дані, цифровий двійник, адаптивна геометрія, локальні деформації.

V. I. DROMENKO

Postgraduate Student at the Department of the Computer Engineering
and Electromechanics
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0009-0007-2957-6969

V. I. CHUPRYNKA

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Professor at the Department of Information and Computer Technologies
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0001-7134-8387

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELLING METHODS TO IMPROVE THE ACCURACY OF THREE-DIMENSIONAL GLOVE DESIGN

The relevance of the study is due to the growing demands for high-precision three-dimensional design of gloves, the need to adequately reproduce the complex morphology of the hand and its biomechanical behavior during movement requires the implementation of the latest mathematical and numerical modeling methods that are able to ensure the adaptability and predictive performance of digital glove prototypes.

The purpose of the article is to scientifically substantiate the use of mathematical modelling methods to enhance the accuracy of 3D glove design through the integrated consideration of anatomical characteristics of the hand, material properties, and finger kinematics. The study investigates the capabilities of parametric modelling, finite element analysis, dynamic anthropometry, and motion-based reconstruction of finger trajectories; numerical methods are used to predict local deformations, analyse the mechanical behaviour of elastomers, and construct a biomechanical digital twin of the «hand-glove» system. Comparative analysis, digital reconstruction techniques, and the framework of integrated parametric design are applied.

It has been established that the accuracy of digital glove models critically depends on the synchronisation of geometric, material, and kinematic parameters. The effectiveness of combining static and dynamic anthropometric data to form adaptive glove geometry has been demonstrated. Key challenges have been identified, including the reconstruction of fine-scale interphalangeal morphology, modelling of combined deformation modes, and integrating nonlinear material behaviour into digital geometry. It has been concluded that the integration of advanced mathematical and numerical methods reduces modelling errors, optimises material thickness and stiffness, ensures stable glove fit, and enhances functional reliability across different application domains.

Future research is expected to focus on improving models of soft-tissue behaviour in dynamic conditions, expanding anthropometric datasets, developing multiphysics simulations to account for thermal and contact effects, and creating standardised digital protocols for virtual testing of next-generation gloves.

Key words: *biomechanical modelling, hand kinematics, finite element analysis, parametric reconstruction, anthropometric data, digital twin, adaptive geometry, local deformation.*

Постановка проблеми

Проблематика підвищення точності тривимірного проектування рукавичок зумовлена зростанням вимог до індивідуалізації, ергономічності та функціональності виробів, що використовуються у медицині, промисловій безпеці, спорті та робототехніці. Анатомічна складність кисті людини, варіативність форм м'яких тканин і нелінійна кінематика дрібних суглобів створюють значні труднощі для відтворення реальної геометрії руки у цифровому середовищі. Традиційні САД-підходи не забезпечують необхідного рівня деталізації та не дозволяють точно моделювати локальні деформації, що виникають під час руху чи навантаження, унаслідок чого погіршується посадка, знижується комфорт користувача і спадає ефективність захисних властивостей виробу. У науковому вимірі це актуалізує завдання розроблення математичних методів, здатних відтворити складну топологію кисті, спрогнозувати деформаційні процеси та інтегрувати антропометричні дані у генерацію адаптивних 3D-форм. У практичному вимірі така проблема пов'язана з потребою скорочення кількості фізичних прототипів, зменшення виробничих похибок і підвищення точності посадки готових рукавичок, особливо у сферах, де невідповідність форми безпосередньо впливає на безпеку або точність виконання операцій. Таким чином, вдосконалення математичного моделювання у тривимірному проектуванні рукавичок становить важливий науково-прикладний напрям, що поєднує фундаментальні дослідження геометричного аналізу з потребами сучасного виробництва та користувачької ергономіки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз сучасних досліджень дозволяє виокремити чотири взаємопов'язані напрями. Перший напрям охоплює формування антропометричної основи тривимірного моделювання та підвищення точності визначення простору «рука-рукавичка» на основі 3D-сканування. У роботі [1] показано, що використання тривимірного сканування дозволяє оцінювати локальні мікрокліматичні параметри та встановлювати зв'язок між геометрією рукавички, зазорами та комфортністю, що є важливим для параметризації цифрових моделей. Обґрунтування застосування сканування кисті для визначення припусків захисних рукавичок, побудувавши метричні залежності між морфологією кисті та конструктивними параметрами виробу наведено в [2]. Автори [3] застосували метод масштабних коефіцієнтів для оцінювання антропометричних характеристик руки й трансформації їх у локальні параметри шитих рукавичок, що підвищує точність індивідуалізації виробів. У роботі [4] автори інтегрували 3D-виміри й показники мобільності пальців у методику побудови ергономічних лекал, оптимізуючи взаємозв'язок між анатомією кисті та конструкцією рукавички. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення уніфікованих математичних моделей антропометричного простору, які поєднували б дані сканування, статистичні параметри та функціональні характеристики рухливості кисті.

Другий напрям пов'язаний із біомеханічним та механічним моделюванням, де математичні методи використовуються для реконструкції рухів пальців, моделювання навантажень та оптимізації функціональних структур.

У дослідженні [5] наведено механічний аналіз процесу знімання медичних рукавичок і показали важливість параметричного визначення контактних зон для запобігання локальним деформаціям шкіри. Побудова числової моделі приводу м'якої реабілітаційної рукавички, оптимізувавши розподіл тиску й траєкторії рухів для точного відтворення природної кінематики кисті представлено у [6]. У роботі [7] запропоновано скінченно-елементну модель біомеханіки хвату, що дозволяє оцінювати силові взаємодії та адаптувати конструкцію екзоскелетної рукавички під індивідуальні особливості користувачів. Використання томографічних даних для побудови персоналізованої кінематичної моделі рухів пальців у низьконапірній реабілітаційній рукавичці, що покращує точність відтворення траєкторій руху наведено у [8]. Подальший розвиток наряду має бути пов'язаний зі створенням комплексних цифрових двійників кисті, які поєднували б геометрію, механіку, кінематику та матеріальні властивості в єдиному обчислювальному середовищі.

Третій напрям охоплює моделювання смарт-рукавичок із використанням електромеханічних, сенсорних та мультифізичних моделей. Автори [9] розробили трикомпонентні магнітореологічні актуатори у структурі TPU-екзоскелета, де деформаційні властивості описано параметричними рівняннями, що дозволяє прогнозувати їх поведінку під навантаженням. У дослідженні [10] запропоновано симуляційний підхід до оптимізації розташування сенсорів у рукавичках для розпізнавання жестів, визначаючи залежність точності ідентифікації сигналів від моделі деформації матеріалу та електромеханічних характеристик сенсорів. Застосування математичних моделей перетворення сигналів тактильної рукавички у тривимірні траєкторії рухів для VR-середовищ, забезпечуючи точне картування багатовимірних сенсорних даних, представлено у [11]. Подальші дослідження мають бути спрямовані на побудову мультифізичних моделей, що інтегруватимуть механічні, електричні та сенсорні процеси для підвищення автономності та точності функціональних рукавичок.

Четвертий напрям охоплює адаптацію методів моделювання складних поверхонь та м'яких тканин, що походять з інших галузей, але є релевантними до високоточного 3D-проектування рукавичок. У роботі [12] автори створили тривимірні гнучкі термоелектричні тканини, у яких теплові та електричні процеси формалізовано через систему рівнянь, що може бути використано для інтеграції автономних енергетичних модулів у рукавички. Можливості скінченно-елементного моделювання м'яких тканин у хірургії, що дає можливість переносити підходи нелінійної механіки на задачу моделювання контакту руки та рукавички продемонстровані у [13]. Автори [14] показали ефективність застосування параметричних САД-моделей для генерації складних поверхонь у виробничому дизайні, що може бути адаптовано для варіювання локальної товщини та структурних властивостей рукавичок у межах інтегрованої цифрової моделі. Подальші дослідження цього напрямку варто зосередити на поєднанні САД/CAE-систем, біомеханічних моделей і технологій формоутворення для створення багаторівневих платформ автоматизованого проектування рукавичок.

Невирішеними залишаються питання високоточної реконструкції складної морфології кисті, зокрема мікрогеометрії міжфалангових зон та поведінки м'яких тканин у динаміці, що сучасні методи сканування й апроксимації не здатні повністю відтворити. Недостатньо досліджені механізми узгодження нелінійних властивостей еластомерних матеріалів із цифровою геометрією, що спричиняє розбіжності між результатами моделювання та фізичними характеристиками рукавичок. Відкритими залишаються також проблеми моделювання локальних деформацій під час комбінованих рухів пальців і дефіцит комплексних моделей, які б одночасно враховували антропометрію, кінематику та матеріальні параметри. Запропоноване дослідження спрямоване на заповнення цих прогалів шляхом інтеграції параметричного моделювання, динамічної антропометрії та скінченно-елементного аналізу в єдиний підхід, що дозволяє узгоджено враховувати форму кисті, її рухливість і механічні властивості матеріалів. Такий підхід забезпечує формування адаптивних цифрових моделей, здатних точно прогнозувати деформації та оптимізувати конструкцію рукавички, що підвищує точність 3D-проектування та знижує похибки під час виготовлення.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є наукове обґрунтування застосування математичних методів моделювання для підвищення точності тривимірного проектування рукавичок з урахуванням анатомічних, матеріалознавчих та ергономічних параметрів кисті людини.

Викладання основного матеріалу дослідження

У сучасному проектуванні рукавичок математичне моделювання геометрії кисті посідає ключове місце, оскільки забезпечує можливість точної візуалізації анатомічних структур, нелінійних кривизн, змін товщини м'яких тканин та варіативності рухів пальців. Розвиток тривимірного сканування, параметричних алгоритмів реконструкції та числових методів аналізу дозволяє створювати високоточні цифрові моделі, здатні адаптуватися до індивідуальних антропометричних відмінностей користувачів. Водночас ефективність цих методів залежить від здатності інтегрувати реальні дані про морфологію кисті з алгоритмічними моделями, що описують деформаційні процеси та взаємодію поверхонь. Науковий інтерес полягає у визначенні оптимальної взаємодії між скануванням, математичною апроксимацією та варіативним моделюванням, що в комплексі формують основу для високоточної 3D-архітектури рукавичок у різних сферах застосування (табл. 1).

Таблиця 1

Математичні підходи до моделювання геометрії кисті у 3D-проектуванні рукавичок

Метод моделювання	Аналітична основа	Можливості для 3D-архітектури рукавичок
Параметрична реконструкція поверхонь	Spline-, NURBS- та B-spline-апроксимація	Формування гладких криволінійних поверхонь кисті та пальців, адаптація під індивідуальні розміри
Тривимірне сканування (3D scanning)	Оптичне, лазерне або фотометричне зчитування геометрії	Отримання детальної морфології кисті з високою роздільністю для побудови точної цифрової основи
Скінченно-елементний аналіз (FEM)	Числове розв'язання рівнянь деформацій	Прогноз локальних напружень і деформацій у матеріалі рукавички при русі та стисканні пальців
Кінематичне моделювання	Математичний опис сегментів та їхніх осей обертання	Відтворення реальної рухливості пальців, оптимізація форми рукавички в динамічних положеннях
Алгоритми машинного навчання	Аналіз антропометричних даних та формотворчих закономірностей	Автоматизоване визначення патернів будови кисті та прогнозування зон найбільшої деформації

(сформовано авторами на основі [2; 9; 10; 13])

Реалізація математичних підходів до моделювання геометрії кисті демонструє, що сучасне 3D-проектування рукавичок ґрунтується на точному відтворенні анатомічної структури та передбачуваності механіки руху, що є принципово важливим для зниження виробничих похибок та підвищення функціональної надійності готових виробів. Параметрична реконструкція забезпечує можливість формувати складні криволінійні поверхні, які точно відповідають топології кисті. Це особливо важливо у зонах найбільшої морфологічної варіативності: міжфалангові проміжки, ділянки тенара та гіпотенара, місця природного викривлення пальців. У практичних умовах виробництва це означає, що геометрія рукавички, створена на основі параметричних моделей, зменшує ризик локальних зон перенапряження, які у традиційних моделях спричиняють швидке зношення та втрату тактильності під час роботи [4]. Застосування тривимірного сканування формує високоточну морфометричну основу, яка дозволяє відтворити індивідуальні геометричні особливості кисті без втрати дрібних деталей [9]. Такий підхід активно впроваджується у створенні анатомічно адаптованих рукавичок для мікрохірургії, де важливо зберігати природний розподіл тиску на кінчиках пальців. У спортивному та промисловому сегментах це забезпечує більш точну посадку виробу, оптимальне позиціонування амортизаційних та антивібраційних вставок та формування зон вентиляції відповідно до реальної поверхні кисті. Скінченно-елементне моделювання забезпечує можливість прогнозувати реакцію матеріалу на деформаційні процеси, що виникають під час хвату, стискання чи швидких рухів пальців. На практиці це дозволяє виробникам визначати оптимальну товщину матеріалу у різних ділянках рукавички ще до етапу фізичного прототипування [11]. У хірургічних рукавичках FEM-моделі використовуються для мінімізації напружень у ділянках, що часто розриваються під час тривалих маніпуляцій, а в рукавичках для роботизованих систем – для точного узгодження жорсткості матеріалу з амплітудою рухів технічних маніпуляторів. Кінематичне моделювання створює можливість оцінювати відповідність виробу не лише у статичному, а й у динамічному стані. Цей підхід особливо цінний у виробництві рукавичок для високоточної діяльності: авіаційне технічне обслуговування, монтаж електронних компонентів, лабораторні маніпуляції [5]. Правильне відтворення осей руху та траєкторій пальців дає змогу уникати надмірної компресії або тертя у критичних зонах, що знижує ризик помилок і травм у реальних умовах роботи. Інтеграція наведених математичних підходів формує сучасну інженерну парадигму, у якій рукавичка розглядається не як універсальний виріб, а як біомеханічно узгоджена система, побудована на основі точних цифрових даних і здатна забезпечити максимальну функціональність у конкретних умовах використання. Саме така науково обґрунтована персоніфікація конструкції визначає конкурентоспроможність сучасних виробників та дозволяє суттєво зменшити кількість ітерацій виробництва, підвищити ергономічність і подовжити термін експлуатації готового виробу.

У сучасному 3D-проектуванні рукавичок числові методи відіграють ключову роль у формуванні передбачуваної механічної поведінки виробу, оскільки дозволяють аналізувати напружено-деформований стан матеріалу ще до етапу фізичного виготовлення. Особливо важливими є скінченно-елементний аналіз та параметрична реконструкція поверхонь, які забезпечують можливість точно оцінювати локальні зони концентрації напружень, моделювати взаємодію рукавички з поверхнею кисті та визначати оптимальні параметри товщини й жорсткості матеріалу. Наукова цінність цих підходів полягає в тому, що вони дозволяють перетворити геометричні дані на прогностичні механічні моделі, де враховано складність рухів пальців, варіативні навантаження та неоднорідні властивості матеріалів. Це створює підґрунтя для конструювання виробів із цілеспрямовано керованими характеристиками, що підвищує надійність, довговічність і комфорт використання (табл. 2).

Практика використання числових методів у проектуванні рукавичок демонструє, що їхня цінність полягає не в самих алгоритмах, а в здатності заздалегідь «побачити» поведінку майбутнього виробу у складних умовах, які неможливо відтворити традиційними технічними вимірюваннями. Коли інженер аналізує цифрову модель, побудовану на основі скінченно-елементного розрахунку, він фактично працює не з геометрією, а з прогнозованими зонами втоми матеріалу, де за певних рухів кисті виникатиме локальне перевантаження. Це дозволяє приймати

рішення, які у практичному сенсі змінюють конструкцію: наприклад, не просто «потовщити» долонну частину, а розмістити матеріал так, щоб він розподіляв напруження при хваті інструмента або під час роботи з важелями, що піддають пальці ротаційним навантаженням. У виробництві хірургічних рукавичок саме числове моделювання дає змогу відтворити ефект «ковзання» внутрішнього шару під час точних маніпуляцій [5]. Традиційні прототиби цього не показували: під час операції рукавичка могла деформуватися мікроскопічно, але достатньо, щоб змінити відчуття інструмента. Числова симуляція дозволяє передбачити ці деформації та оптимізувати товщину матеріалу саме в тих точках, які найбільше впливають на тактильність. Параметрична реконструкція поверхонь у сучасній практиці працює не як засіб «мальовничого згладжування» форми, а як інструмент керування поведінкою виробу у русі [4]. Наприклад, у рукавичках для авіаційних техніків моделі показують, що навіть мінімальна зміна радіуса кривизни на фаланговому сегменті впливає на рівномірність згинання під час захоплення дрібних деталей [10]. На основі цих даних формується мікрогеометрія, яка забезпечує однакову амплітуду руху незалежно від положення пальця. У лабораторних термостійких рукавичках цей підхід дозволяє розвантажити ділянки, що нагріваються швидше за інші, і забезпечити рівномірний розподіл теплової деформації. Особливо показовими є результати під час моделювання контактних взаємодій. У промислових рукавичках для роботи в умовах постійної вібрації, наприклад при роботі зі шліфувальними машинами, числова модель дає можливість бачити, як саме хвилі мікрівібрацій проходять через матеріал і де виникають «вузли» напружень, які спричиняють втому руки. На основі таких моделей створюються антивібраційні зони, що повторюють природні лінії навантаження на долоні, а не довільно розташовані вставки, як це було раніше. У спортивних рукавичках, зокрема для скелелазіння чи велоспорту, цифрові симуляції показують, як змінюється товщина матеріалу під час повторюваних рухів [5]. Це дозволяє передбачити місця потенційного стирання ще до першого фізичного зразка. Таким чином виробник отримує можливість продовжити строк служби виробу, не додаючи зайву товщину, яка погіршує чутливість. У сукупності такі підходи перетворюють рукавичку на динамічний об'єкт, у якому геометрія, матеріал та функція взаємодіють на рівні науково прорахованих сценаріїв, а не емпіричних припущень. Саме це забезпечує високу точність посадки, керованість деформацій та прогнозовану поведінку матеріалу у середовищах, де помилка вимірюється не міліметрами, а ефективністю руху або безпекою користувача.

Таблиця 2

Числові методи для прогнозування деформацій та оптимізації матеріалу у 3D-проектуванні рукавичок

Числовий метод	Об'єкт аналізу	Практична інженерна функція
Скінченно-елементний аналіз (FEM)	Напружено-деформований стан матеріалу під змінними навантаженнями	Передбачення зон пікових деформацій, розрахунок оптимальної товщини та пружності
Параметрична реконструкція поверхонь	Геометрична структура та локальні радіуси кривизни	Формування адаптивного розподілу матеріалу відповідно до складності поверхні
Адаптивне сіткування	Локальна деталізація геометричних ділянок	Підвищення точності розрахунків у зонах критичних змін форми
Числова оптимізація (градієнтні та еволюційні методи)	Варіативні конфігурації товщини, жорсткості та розтяжності	Автоматизований пошук конструкційних параметрів для досягнення балансу між гнучкістю та міцністю
Моделювання контактних взаємодій	Поведінка рукавички при ковзанні, стиску, ротації пальців	Визначення умов прилягання без надмірного тиску чи втрати чутливості

(сформовано авторами на основі [5; 7; 8])

Інтеграція антропометричних даних із моделюванням рухів пальців у сучасному проектуванні рукавичок відкриває можливість створення цифрових моделей, які не просто відтворюють зовнішні контури кисті, а адаптуються до її реальної кінематики. Наукова цінність такого підходу полягає в поєднанні двох типів інформації – статичної морфології та динамічної рухливості суглобів. Це дозволяє проектувати рукавичку як систему, що враховує зміну форми пальців упродовж циклу руху, різні амплітуди згинання та індивідуальну анатомічну варіативність. У результаті створюються моделі з передбачуваною поведінкою, здатні компенсувати локальні деформації під час роботи і забезпечувати стабільну посадку незалежно від положення пальців (табл. 3).

Поєднання антропометричних і кінематичних параметрів працює як механізм точного налаштування цифрової моделі під реальну поведінку кисті, дозволяючи прогнозувати не лише форму, а й зміну внутрішніх об'ємів рукавички під час руху. У хірургічних рукавичках це дає можливість моделювати мікродеформації під час дрібних маніпуляцій: цифрова модель показує, як навіть незначне збільшення амплітуди згинання впливає на напруження матеріалу, що дозволяє оптимізувати товщину в критичних ділянках без втрати тактильності. У спортивному екіпіруванні кінематичні траєкторії використовують для визначення зон, які зазнають регулярних циклічних навантажень: наприклад, у рукавичках для скелелазіння моделі показують, де формується пікове стискання тканини під час хвату, що дає можливість розміщувати еластичні елементи відповідно до реальних ліній руху, а не довільно [5]. У робототехнічних інтерфейсних рукавичках поєднання антропометрії та моделювання рухів дозволяє зберігати сталий контакт між сенсорами та шкірою під час швидких жестових команд, що неможливо

забезпечити за допомогою статичної геометрії [9]. У виробничих процесах, пов'язаних із точним монтажем, цифрові моделі демонструють, як змінюється мікрорельєф внутрішньої поверхні рукавички при дрібній моториці, дозволяючи уникати надмірного повітряного об'єму, що знижує точність позиціонування пальців. У результаті антропометрично-кінематичні моделі забезпечують створення рукавичок, які не лише точно відповідають формі руки, а й функціонують узгоджено з її рухами, зберігаючи стабільність посадки та ефективність роботи у складних і динамічних умовах.

Таблиця 3

Антропометричні та кінематичні параметри для побудови адаптивних цифрових моделей рукавичок

Тип параметра	Характеристика	Значення для адаптивної моделі
Лінійні антропометричні показники	Довжини фаланг, ширина долоні, товщина м'яких тканин	Формують базову геометрію та масштаби моделі з урахуванням індивідуальної будови кисті
Кутові параметри рухливості	Амплітуди згинання та розгинання міжфалангових і п'ястково-фалангових суглобів	Дають змогу відтворити реальну кінематику пальців для коректного моделювання посадки під час руху
Траєкторії руху пальців	Просторові траєкторії, швидкість і послідовність рухів	Використовуються для аналізу зміни форми рукавички у динамічних положеннях
Розподіл м'яких тканин	Локальні зони стиснення та розширення під час руху	Дають можливість прогнозувати ділянки необхідної еластичності чи посилення
Контактні характеристики	Площі контакту пальців з поверхнею під час виконання захопленя	Забезпечують формування оптимального внутрішнього об'єму та силового розподілу

(сформовано авторами на основі [3; 5; 7; 14])

У процесі створення високоточної цифрової моделі рукавички постає низка науково-прикладних проблем, що ускладнюють відтворення реальної морфології кисті та прогнозування її поведінки у русі. Найбільш суттєві труднощі пов'язані з багатошаровою структурою кисті: кістково-суглобовий каркас, неоднорідні м'які тканини та підшкірний жир мають різні механічні властивості, які змінюються під час руху і не піддаються простій математичній апроксимації [4]. Високу складність становить відтворення локальних кривизн і мікрогеометрії – особливо у міжфалангових ділянках, де навіть мінімальні помилки реконструкції змінюють поведінку цифрової моделі під навантаженням [11]. Додатковим викликом є деформаційна непередбачуваність м'яких тканин: їхня реакція на стискання залежить від швидкості руху, температури, вологості та індивідуальних анатомічних характеристик, що ускладнює побудову універсальних матеріальних моделей. Суттєвою проблемою також є точність моделювання локальних деформацій під час складних типів рухів, таких як комбіноване згинання та ротація пальців [3]. Наявні алгоритми часто не здатні адекватно передбачити зміну розподілу об'ємів під шкірою, що впливає на посадку рукавички в динаміці. У роботі з цифровою геометрією виникає проблема узгодження матеріальних властивостей рукавички з прогнозованою поведінкою кисті: еластомери, латекси та полімерні композити мають нелінійну залежність між напруженням і деформацією, яку важко коректно інтегрувати в алгоритми геометричного моделювання. Це призводить до ситуацій, коли цифрова модель демонструє стабільну поведінку, але фізичний виріб деформується інакше, особливо в тонких зонах. Окрему групу проблем формують труднощі отримання повного та чистого антропометричного масиву. Оптичні та лазерні сканери викривлюють мікродеталі через тіні, шорсткість шкіри або рух пальців, унаслідок чого виникають артефакти, які неможливо усунути без втрати точності. Динамічні дані рухів пальців також є складними для інтеграції, оскільки існує дисбаланс між високою точністю геометрії і недостатньою точністю кінематичної інформації, що знижує достовірність моделей локального навантаження [2]. Проблеми масштабуються й на рівні контактної взаємодії: сучасні симулятори погано відтворюють поведінку матеріалів у контакті зі шкірою, особливо при повторюваних циклічних рухах. Це породжує похибки у визначенні зон надмірного тиску, де на практиці виникають потертості або розтягнення матеріалу. Технічно складним є також узгодження моделі рукавички з широким спектром індивідуальних варіацій кисті – навіть у межах однієї розмірної групи спостерігаються суттєві відмінності в товщині м'яких тканин, кутах рухливості та пропорціях фаланг.

Підвищення точності 3D-проекування рукавичок потребує переходу від спрощених геометричних моделей до комплексних цифрових реконструкцій, у яких форма кисті, матеріальні властивості та кінематика описуються як єдина біомеханічна система. Науково обґрунтованим є розширення антропометричних баз за рахунок високоточного статичного та динамічного сканування, що дозволяє формувати параметричні моделі, здатні відтворювати індивідуальну морфологію та реальні траєкторії рухів пальців. Важливим напрямом є вдосконалення матеріальних моделей: точне визначення нелінійних механічних властивостей еластомерів і багатошарових структур забезпечує коректну інтеграцію цих даних у скінченно-елементні розрахунки, що суттєво зменшує похибки у прогнозуванні деформацій. Практична ефективність зростає завдяки створенню інтегрованих цифрових контурів, де 3D-сканування, параметричне моделювання та FEM-аналіз функціонують у єдиній системі без втручання ручних

корекцій. Це мінімізує технічні помилки та забезпечує відтворюваність результатів. Додатково доцільним є застосування методів керування невизначеністю, коли конструкція тестується у цифровому середовищі в широкому діапазоні варіацій товщини, жорсткості та об'ємних допусків – такий підхід гарантує стабільну посадку навіть за виробничих коливань. Перспективним напрямом є впровадження галузевих протоколів віртуального випробування, що дозволяють оцінювати якість посадки, розподіл контактних напружень і стійкість внутрішнього об'єму у спеціалізованих сценаріях: хірургія, робототехніка, промислова безпека чи спорт. У підсумку це забезпечує перехід від емпіричного підбору конструкцій до науково обґрунтованого математичного моделювання, яке знижує кількість ітерацій, скорочує частку браку і підвищує точність виготовлення готових рукавичок.

Висновки

Проведене дослідження засвідчило, що підвищення точності тривимірною проектування рукавичок можливе лише за умов поєднання геометричного моделювання з числовими та біомеханічними підходами. Встановлено, що високоточна реконструкція кисті потребує інтеграції статичної антропометрії, динамічних кінематичних даних та каліброваних матеріальних моделей, що дозволяє формувати цифрові конструкції, які відтворюють не лише форму, а й реальну поведінку пальців під час руху. Доведено, що традиційні CAD-методи не забезпечують необхідної точності в зонах локальних деформацій, тоді як використання параметричної реконструкції та скінченно-елементного аналізу суттєво підвищує здатність моделі передбачати напруження, розподіл товщин і зони потенційного зношення. У ході дослідження ідентифіковано низку фундаментальних проблем: складність відтворення мікрогеометрії міжфалангових сегментів, нестабільність поведінки м'яких тканин у динаміці, похибки сканування та обмежені можливості сучасних алгоритмів правильно моделювати поєднане згинання, ротацію й стискання. Встановлено також, що невідповідність між симульованими і реальними деформаціями часто зумовлена неточністю опису нелінійних властивостей еластомерів, що ускладнює передбачення поведінки виробу у тонких або високо навантажених зонах. Науково обґрунтовані рекомендації стосуються переходу до комплексних біомеханічних цифрових двійників кисті, удосконалення матеріальних моделей, розширення антропометричних баз даних за рахунок динамічних сканів, впровадження методів керування невизначеністю у FEM-розрахунках та стандартизації наскрізного цифрового контуру проектування. Такий підхід забезпечує надійну посадку рукавичок, зменшення виробничих похибок і скорочення кількості фізичних прототипів. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням точніших моделей поведінки м'яких тканин, удосконаленням методів інтеграції кінематики та антропометрії, створенням мультифізичних симуляцій для оцінювання теплових і контактних ефектів, а також формуванням галузевих стандартів віртуального тестування виробів. Це відкриває шлях до науково обґрунтованого персоналізованого виготовлення рукавичок нового покоління.

Список використаної літератури

1. Joshi A., Li R., Wu Y., Zhang M., Song G. Analysis of glove local microclimate properties for various glove types and fits using 3D scanning method. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, № 1. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23596>
2. Zhang Y., Xie H., Newton M. A. A. Enhancing assistive technology design: Biomechanical finite element modeling for grasping strategy optimization in exoskeleton data gloves. *Medical Engineering & Physics*. 2025. Vol. 137. Article 104308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2025.104308>
3. Szkudlarek J., Zagrodny B., Zarychta S., Zhao X. 3D hand scanning methodology for determining protective glove dimensional allowances. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. Vol. 20, № 3. Article 2645. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20032645>
4. Lee S. M., Park J. Ergonomic glove pattern drafting method for hand assistive devices: considering 3D hand dimensions and finger mobility. *Fashion and Textiles*. 2024. Vol. 11, № 31. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40691-024-00397-5>
5. Ishak M. I., Sikam M. D. J., Wan Draman W. N. A. Mechanical Design and Analysis of Medical Gloves Remover. *Malaysian Journal of Ergonomics (MJE)*. 2023. Vol. 5. P. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.58915/mjer.v5i1.362>
6. Wang X., Cheng Y., Zheng H., Li Y., Wang C. Design and optimization of actuator for multi-joint soft rehabilitation glove. *Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application*. 2021. Vol. 48, № 6. P. 877–890. DOI: <https://doi.org/10.1108/IR-02-2021-0036>
7. Leite C., Byvshev P., Mauranen H., Xiao Y. Simulation-driven design of smart gloves for gesture recognition. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, № 1. Article 14873. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65069-2>
8. Seo S. W., Jung W. S., Kim Y. 3D hand motion generation for VR interactions using a haptic data glove. *Multimodal Technologies and Interaction*. 2024. Vol. 8, № 7. Article 62. DOI: <https://doi.org/10.3390/mti8070062>
9. Rincón-Becerra O., García-Acosta G. Estimation of anthropometric hand measurements using the ratio scaling method for the design of sewn gloves. *Dyna*. 2020. Vol. 87, № 215. P. 146–155. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.87984>
10. Yu J., Luo L., Zhu W., Li Y., Xie P., Zhang L. A Novel Low-Pressure Robotic Glove Based on CT-Optimized Finger Joint Kinematic Model for Long-Term Rehabilitation of Stroke Patients. *IEEE Transactions on Neural Systems*

and Rehabilitation Engineering. 2024. Vol. 32. P. 53–62. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2023.3337827>

11. Gong T., Ma K., Liu Z., Yang T., Xu Q., Li L. A Hand Rehabilitation Device Based on Magnetorheological Three-Dimensional Soft Actuators TPU Exoskeleton. In: *Proceedings of the 2024 China Automation Congress (CAC)*. Qingdao, China, 2024. P. 4218–4223. DOI: <https://doi.org/10.1109/CAC63892.2024.10865009>

12. He X., Shi X. L., Wu X., Li C., Liu W. D., Zhang H., Chen Z. G. Three-dimensional flexible thermoelectric fabrics for smart wearables. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16, № 1. Article 2523. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57889-1>

13. Thomas P. M. Three-dimensional soft tissue simulation in orthognathic surgery. *Atlas of the Oral and Maxillofacial Surgery Clinics of North America*. 2020. Vol. 28, № 2. P. 73–82. URL: [https://www.oralmaxsurgeryatlas.theclinics.com/article/S1061-3315\(20\)30005-6/abstract](https://www.oralmaxsurgeryatlas.theclinics.com/article/S1061-3315(20)30005-6/abstract) (дата звернення: 13.11.2025)

14. Sun X., Liu X., Yang X., Song B. Computer-aided three-dimensional ceramic product design. *Computer-Aided Design and Applications*. 2021. Vol. 19, № S3. P. 97–107. DOI: <https://doi.org/10.14733/cadaps.2022.S3.97-107>

References

1. Joshi, A., Li, R., Wu, Y., Zhang, M., & Song, G. (2024). Analysis of glove local microclimate properties for various glove types and fits using 3D scanning method. *Heliyon*, 10(1). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23596>

2. Zhang, Y., Xie, H., & Newton, M. A. A. (2025). Enhancing assistive technology design: Biomechanical finite element modeling for grasping strategy optimization in exoskeleton data gloves. *Medical Engineering & Physics*, 137, Article 104308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2025.104308>

3. Szkudlarek, J., Zagrodny, B., Zarychta, S., & Zhao, X. (2023). 3D hand scanning methodology for determining protective glove dimensional allowances. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), Article 2645. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20032645>

4. Lee, S. M., & Park, J. (2024). Ergonomic glove pattern drafting method for hand assistive devices: considering 3D hand dimensions and finger mobility. *Fashion and Textiles*, 11(31). DOI: <https://doi.org/10.1186/s40691-024-00397-5>

5. Ishak, M. I., Sikam, M. D. J., & Wan Draman, W. N. A. (2023). Mechanical Design and Analysis of Medical Gloves Remover. *Malaysian Journal of Ergonomics (MJEr)*, 5, 47–55. DOI: <https://doi.org/10.58915/mjer.v5i1.362>

6. Wang, X., Cheng, Y., Zheng, H., Li, Y., & Wang, C. (2021). Design and optimization of actuator for multi-joint soft rehabilitation glove. *Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application*, 48(6), 877–890. DOI: <https://doi.org/10.1108/IR-02-2021-0036>

7. Leite, C., Byvshev, P., Mauranen, H., & Xiao, Y. (2024). Simulation-driven design of smart gloves for gesture recognition. *Scientific Reports*, 14(1), Article 14873. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65069-2>

8. Seo, S. W., Jung, W. S., & Kim, Y. (2024). 3D hand motion generation for VR interactions using a haptic data glove. *Multimodal Technologies and Interaction*, 8(7), Article 62. DOI: <https://doi.org/10.3390/mti8070062>

9. Rincón-Becerra, O., & García-Acosta, G. (2020). Estimation of anthropometric hand measurements using the ratio scaling method for the design of sewn gloves. *Dyna*, 87(215), 146–155. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.87984>

10. Yu, J., Luo, L., Zhu, W., Li, Y., Xie, P., & Zhang, L. (2024). A Novel Low-Pressure Robotic Glove Based on CT-Optimized Finger Joint Kinematic Model for Long-Term Rehabilitation of Stroke Patients. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 32, 53–62. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2023.3337827>

11. Gong, T., Ma, K., Liu, Z., Yang, T., Xu, Q., & Li, L. (2024). A Hand Rehabilitation Device Based on Magnetorheological Three-Dimensional Soft Actuators TPU Exoskeleton. In: *Proceedings of the 2024 China Automation Congress (CAC)*, Qingdao, China. P. 4218–4223. DOI: <https://doi.org/10.1109/CAC63892.2024.10865009>

12. He, X., Shi, X. L., Wu, X., Li, C., Liu, W. D., Zhang, H., & Chen, Z. G. (2025). Three-dimensional flexible thermoelectric fabrics for smart wearables. *Nature Communications*, 16(1), Article 2523. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57889-1>

13. Thomas, P. M. (2020). Three-dimensional soft tissue simulation in orthognathic surgery. *Atlas of the Oral and Maxillofacial Surgery Clinics of North America*, 28(2), 73–82. URL: [https://www.oralmaxsurgeryatlas.theclinics.com/article/S1061-3315\(20\)30005-6/abstract](https://www.oralmaxsurgeryatlas.theclinics.com/article/S1061-3315(20)30005-6/abstract) (дата звернення: 13.11.2025)

14. Sun, X., Liu, X., Yang, X., & Song, B. (2021). Computer-aided three-dimensional ceramic product design. *Computer-Aided Design and Applications*, 19(S3), 97–107. DOI: <https://doi.org/10.14733/cadaps.2022.S3.97-107>

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 19.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

О. Г. ЗІНОВ'ЄВА

старший викладач кафедри комп'ютерних наук
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного
ORCID: 0000-0003-3760-8952

М. М. ГОРОНЕСКУЛЬ

старший викладач кафедри комп'ютерних наук
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного
ORCID: 0000-0002-3550-7640

ПІДТРИМКА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У РОЗРОБЛЕННІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ AGILE-ІНСТРУМЕНТІВ

У статті досліджено значення Agile-інструментів як засобу підтримки процесів прийняття рішень у процесі розроблення програмного забезпечення в умовах високої невизначеності та динамічних змін вимог. Сучасні проекти розроблення програмного забезпечення характеризуються складністю, необхідністю швидкого реагування на ринкові тренди та вимоги замовників, що робить процес прийняття рішень важливим фактором успіху. Традиційні каскадні методології часто виявляються неефективними, оскільки передбачають прийняття ключових рішень на початкових етапах проєкту за найвищого рівня невизначеності.

У роботі проаналізовано основні типи рішень, які приймаються командами розробників: стратегічні (вибір технологій, архітектурні підходи), тактичні (планування спринтів, пріоритизація), оперативні (щоденні завдання, технічні рішення) та адаптивні (реакція на зміни). Обґрунтовано принципи ефективного використання Agile-інструментів: прозорість даних через візуалізацію та регулярні церемонії, колективне прийняття рішень з використанням технік фасилітації, емпіричний підхід на основі даних та метрик, адаптивність і готовність переглядати рішення, автономія команди для оперативних рішень. Розроблено практичні рекомендації щодо застосування Agile-інструментів залежно від розміру команди та контексту проєкту: для стартапів та малих команд запропоновано мінімалістичний підхід з фокусом на Kanban та базових метриках; для середніх команд рекомендовано повноцінний Scrum з структурованими церемоніями; для великих організацій обґрунтовано необхідність фреймворків масштабування та централізованих систем метрик. Підкреслено освітній аспект впровадження Agile-інструментів: використання цифрових дошок, метрик, спринтів і командних нарад сприяє формуванню професійних компетентностей майбутніх IT-фахівців, розвитку вміння працювати з вимогами, аналізувати ризики та приймати колективні рішення.

Перспективи подальших досліджень включають вивчення впливу штучного інтелекту на автоматизацію підтримки прийняття рішень та аналіз ефективності Agile-практик у розподілених командах.

Ключові слова: Agile, прийняття рішень, розроблення програмного забезпечення, Scrum, Kanban, метрики, управління проєктами, Sprint Planning, Product Backlog, DORA метрики.

O. G. ZINOVIEVA

Senior Lecturer at the Department of Computer Sciences
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University
ORCID: 0000-0003-3760-8952

M. N. GORONESCUL

Senior Lecturer at the Department of Computer Sciences
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University
ORCID: 0000-0002-3550-7640

SUPPORTING DECISION MAKING IN SOFTWARE DEVELOPMENT USING AGILE TOOLS

The article examines the significance of Agile tools as a means of supporting decision-making processes in software development under conditions of high uncertainty and rapidly changing requirements. Contemporary software projects are characterized by complexity and the necessity to respond quickly to market trends and customer demands, which

makes the decision-making process a critical success factor. Traditional waterfall methodologies often prove ineffective because they require key decisions to be made at the early stages of a project when uncertainty is greatest.

The paper analyzes the main types of decisions made by development teams: strategic (technology selection, architectural approaches), tactical (sprint planning, prioritization), operational (daily tasks, technical decisions) and adaptive (responses to changes). It substantiates principles for the effective use of Agile tools: data transparency through visualization and regular ceremonies; collective decision-making enabled by facilitation techniques; an empirical, data- and metrics-driven approach; adaptability and readiness to revisit decisions; and team autonomy for operational choices. Practical recommendations are developed for applying Agile tools depending on team size and project context: for startups and small teams, a minimalist approach focused on Kanban and basic metrics is proposed; for medium-sized teams, a full Scrum implementation with structured ceremonies is recommended; for large organizations, the need for scaling frameworks and centralized metrics systems is justified.

The educational aspect of adopting Agile tools is emphasized: the use of digital boards, metrics, sprints and team meetings contributes to the formation of professional competencies in future IT specialists, the development of skills for working with requirements, risk analysis, and collective decision-making.

Prospects for further research include studying the impact of artificial intelligence on the automation of decision-support and analyzing the effectiveness of Agile practices in distributed teams.

Key words: Agile, decision-making, software development, Scrum, Kanban, metrics, project management, Sprint Planning, Product Backlog, DORA metrics.

Постановка проблеми

Сучасні розробки програмного забезпечення характеризуються високим рівнем невизначеності, швидкими змінами вимог замовників та необхідності оперативного реагування на ринкові тренди. За таких умов процес прийняття рішень стає критичним фактором успіху проекту. Традиційні каскадні методології розроблення часто виявляються неефективними, оскільки передбачають прийняття стратегічних рішень на початкових етапах проекту, коли рівень невизначеності є найвищим [1,2].

Команди розробників щодня стикаються з необхідністю прийняття рішень різного рівня складності: від вибору технологічного стеку та архітектурних патернів до визначення пріоритетів завдань та оптимізації робочих процесів. Відсутність структурованого підходу до підтримки прийняття рішень призводить до зниження продуктивності команди, перевитрат ресурсів та незадоволення замовників.

Кожне рішення в процесі розробки може вплинути на кінцевий результат, якість продукту та задоволення користувачів. При цьому недолік інформації, неясні вимоги і тиск термінів можуть ускладнювати процес прийняття рішення. Крім того, в Agile-обстановці команди часто працюють у швидко мінливих умовах, що потребує швидкої адаптації та проактивного підходу до управління ризиками та очікуваннями зацікавлених сторін.

Agile-методології пропонують альтернативний підхід, що базується на ітеративності, адаптивності та постійному зворотному зв'язку [3]. Тому питання ефективного використання Agile-інструментів саме для підтримки прийняття рішень потребує детального дослідження та систематизації існуючих практик.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження в галузі Agile-методологій активно розвиваються протягом останніх двох десятиліть. Фундаментальні принципи Agile були сформульовані у 2001 році в Agile Manifesto, що заклав основу для інших методологій, включаючи Scrum, Kanban, Extreme Programming (XP) та інших.

У працях К. Бека [1] та М. Кона [3] розкрито відповідно принципи Extreme Programming та необхідність використання юзер-сторі як основи для прийняття продуктових рішень. К. Швабер і Д. Сазерленд [2] детально описують процес Scrum як таку організацію командної взаємодії, де рішення ухвалюються ітеративно та максимально прозоро.

Сучасні дослідження зосереджуються на використанні даних та метрик для підтримки прийняття рішень. Н. Форсгрєн, Дж. Хамбл та Дж. Кім у своїй роботі [4] представили емпіричний аналіз факторів, що впливають на ефективність команд розроблення, та запропонували ключові метрики для оцінювання продуктивності.

Вітчизняні автори також активно досліджують зазначену проблематику: зокрема, особливості застосування Agile в освіті та науковій роботі студентів висвітлено у працях І.І. Гарко, М.В. Пирог та В.Л. Міронова [6], Горонескуль М.М., Зінов'євої О.Г. [7]. Питання інструментальної підтримки розробки було висвітлено у працях Маслянюк П.П. [8], Орлова М. та ін. [9], Киричек Г.Г. та Чубича А.І. [10].

Однак, незважаючи на численні публікації, бракує комплексного дослідження, яке б систематизувало Agile-інструменти саме з точки зору підтримки прийняття рішень та надало практичні рекомендації щодо їх застосування в різних контекстах.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є аналіз механізмів підтримки прийняття рішень у процесі розроблення програмного забезпечення на основі Agile-інструментів та оцінка їх ефективності у навчальній, науковій та професійній діяльності.

Викладення основного матеріалу дослідження

У сучасному підході до управління проектами гнучкість та адаптивність відіграють вирішальну роль для досягнення успіху. Методології Agile забезпечують командам можливість оперативного реагувати на зміни та ефективніше справлятися з непередбаченими ситуаціями. Замість суворого дотримання початкового плану, Agile сприяє безперервному вдосконаленню процесів і їхній адаптації до актуальних вимог проєкту. Agile як підхід гнучкої розробки спрямований на оперативне досягнення найкращих результатів при створенні нового продукту, а також на ефективне використання ресурсів – тимчасових, трудових та фінансових – в умовах існуючої невизначеності. Одним із основних принципів Agile є міжособистісна взаємодія. Ефективні комунікації всередині команди дозволяють уникнути непорозумінь та розбіжностей у розумінні завдань. Застосування таких практик, як щоденні стендапи, ретроспективи та планування ітерацій, створює майданчик для обміну думками та покращення процесу прийняття рішень.

Щоденні стендапи, зокрема, надають команді можливість визначити поточні перешкоди та поставити питання, які вимагають негайного вирішення. Це не тільки допомагає команді швидше приймати рішення, але й сприяє створенню довірчої атмосфери, де кожен член команди почуватися почутим та цінним.

Системи та практики Agile створені не лише для організації командної роботи, але й для формування адаптивного механізму прийняття рішень, у якому інформація передається швидко, а невизначеність зменшується шляхом постійного зворотного зв'язку та емпіричної перевірки гіпотез. У сучасних IT-проєктах, де кількість залежностей велика, а зміни неминучі, Agile-інструменти виконують роль «операційної системи» управління рішеннями – від стратегічних до щоденних.

Підтримка прийняття рішень (ППР) в контексті Agile має децентралізований та емпіричний характер. Рішення приймаються на різних рівнях (стратегічному, тактичному, оперативному) і базуються на фактичних даних та зворотному зв'язку. Agile-інструменти, такі як Jira Software, Microsoft Azure DevOps або Asana, виконують функцію не лише трекерів завдань, але й централізованих репозиторіїв даних, які є основою для ППР.

Основні типи рішень, що підтримуються інструментами:

- 1) Стратегічні рішення: визначення пріоритетності функціоналу, планування дорожньої карти продукту(ар).
- 2) Тактичні рішення: оцінка ризиків спринту, розподіл ресурсів, визначення критичних залежностей.
- 3) Оперативні рішення: вибір технічного рішення, управління потоком завдань на дошці Kanban, самоорганізація команди [6].

Розглянемо основні інструменти Agile, які безпосередньо впливають на процес прийняття рішень.

Одним із ключових інструментів успішної розробки будь-якого програмного продукту є беклог. Цей документ створюється на початковому етапі роботи над проєктом та відіграє найважливішу роль у його коректній реалізації, особливо при використанні сучасних методологій розробки, таких як Scrum чи Agile.

Product Backlog – це не просто список задач, а динамічна модель потреб замовника, яка постійно уточнюється на основі нових даних. Його формування вимагає:

- аналізу ринкових трендів, обмежень і можливостей;
- оцінки бізнес-цінності кожного елемента;
- визначення критичних залежностей між функціональними компонентами;
- управління ризиками (ризик-функції, ризик-вартість).

У практиці великих організацій беклог стає також інструментом прийняття інвестиційних рішень.

Sprint Planning – планування спринту, під час якої команда приймає рішення щодо обсягу роботи, яку можна виконати протягом ітерації. В одному проєкті таких документів може бути декілька, що відповідає кількості спринтів. У процесі планування спринту команда фактично здійснює експертно-аналітичне прогнозування. Планування у великих командах виконує роль сценарного аналізу: обговорюються сценарії «що буде, якщо...», оцінюється вплив змінних (обмеженість часу, ресурси, зовнішні залежності). На основі цього команда робить спільний вибір найраціональнішого рішення.

Agile-методології передбачають використання різноманітних методів планування, які допомагають командам оцінювати ризики та визначати пріоритети. Одним з найпоширеніших методів є техніка MoSCoW, яка дозволяє командам класифікувати вимоги за пріоритетами: "Must have" (обов'язково), "Should have" (слід мати), "Could have" (можна мати), "Won't have this time" (не маємо на цей раз). Це дозволяє зосередитися на найважливіших аспектах проєкту та уникнути перевантаження непотрібними деталями.

Візуальні інструменти грають ключову роль Agile-розробці. Наприклад, використання Kanban-дошок дозволяє командам відстежувати прогрес завдань у реальному часі. Дошки допомагають бачити, які завдання в роботі, які завершені, а які ще потрібно виконати. Це візуальне уявлення полегшує комунікативні процеси та допомагає пріоритизувати завдання на основі їх важливості та терміновості.

Канбан-дошка перетворює потік роботи на візуальну модель процесу, де кожна задача проходить чітко окреслені стани. Така структура підтримує прийняття рішень кількома шляхами:

1) Миттєве виявлення «вузьких місць», що дозволяє приймати рішення про перерозподіл навантаження або усунення перешкод.

2) Принцип “Work in Progress Limit (WIP)”, який запобігає перевантаженню системи, а отже – дозволяє уникнути рішень, які базуються на неправильно оцінених можливостях команди.

3) Прозорість прогресу, що дає змогу керівництву та стейкхолдерам ухвалювати обґрунтовані рішення на основі фактичного стану, а не суб'єктивних звітів.

Іншими словами, Kanban створює наочне інформаційне поле, у якому рішення приймаються швидше та точніше.

Цифрові інструменти управління проектами та розробкою програмного забезпечення еволюціонували від простих систем відстеження завдань до комплексних платформ підтримки прийняття інформаційних рішень. Сучасні інструменти, такі як Jira, Trello та Azure DevOps, забезпечують не лише координацію роботи команд, але й створюють інформаційне середовище, що дозволяє приймати обґрунтовані управлінські та технічні рішення на основі даних у реальному часі.

Jira, розроблена компанією Atlassian, є однією з найпопулярніших платформ для управління проектами та відстеження завдань. Архітектура Jira побудована на принципах гнучкості та масштабованості, що дозволяє адаптувати систему до потреб різних команд і організацій. Її функціонал підтримує різні методології, включаючи Scrum та Kanban, та надає широкі можливості для моніторингу ходу виконання проекту. У Jira є всі необхідні функції для планування, відстеження та аналізу завдань, а також підтримки прозорості процесів, що сприяє оперативному прийняттю рішень. Важливо, що Jira дозволяє налаштовувати робочі процеси під потреби команди та використовувати вбудовані інструменти для візуалізації та аналізу даних.

Trello, також продукт Atlassian, побудований на принципах візуальної простоти та інтуїтивності. Це візуальний інструмент для управління проектами, що підходить як для невеликих команд, так і для великих організацій. Він дозволяє організовувати завдання у вигляді карток, які можуть переміщатися різними колонками залежно від стадії їх виконання. Незважаючи на свою простоту, Trello може бути потужним інструментом для підтримки прийняття рішень завдяки гнучкості та можливостям налаштування.

Azure DevOps – це інтегрована платформа для розробки програмного забезпечення, яка поєднує управління проектами, контроль версій, CI/CD та багато інших функцій в одному місці. Цей інструмент активно використовується командами, що працюють за методологіями Agile, завдяки своїй гнучкості та потужним аналітичним можливостям. Azure DevOps надає зручний інтерфейс для керування завданнями та дефектами, що дозволяє швидко коригувати проектні рішення в залежності від зміни вимог чи виникнення проблем. Платформа добре інтегрується з іншими інструментами Microsoft, такими як Teams і Office 365, що полегшує спільну роботу та прийняття рішень.

Сучасні цифрові платформи виконують роль інструментів інтеграції рішень. Вони забезпечують прозорість усіх процесів, дозволяють автоматизувати частину прийняття рішень, поєднують метрики, борди, backlog, аналітику та звітність, створюють цифровий слід кожного рішення.

Таким чином вони функціонують як інформаційно-аналітичні центри підтримки проектних рішень.

Agile-інструменти збирають та систематизують ряд ключових метрик, які є "сировиною" для прийняття рішень (табл. 1).

Таблиця 1

Метрики Agile-інструментів

Метрика	Agile-інструмент	Рішення, яке підтримується
Velocity (Швидкість)	Jira, Azure DevOps	Прогнозування завершення проекту, визначення обсягу наступного спринту
Cycle Time (Час циклу)	Jira, Kanban-дошка	Оптимізація процесу, виявлення "вузьких місць", усунення перешкод
Burn-down/Burn-up Charts	Jira, Trello (доповнення)	Моніторинг прогресу, визначення необхідності корекції курсу чи додаткових ресурсів
Lead Time (Час виконання)	Kanban-дошка	Оцінка ефективності постачання цінності кінцевому користувачу
Technical Debt (Технічний борг)	Спеціалізовані поля в картках завдань	Рішення про інвестування ресурсів у рефакторинг або нові функції

Agile-метрики забезпечують об'єктивну, кількісну основу для управлінських рішень, дозволяючи командам та організаціям оптимізувати процеси, прогнозувати результати та безперервно покращувати продуктивність.

Метрики в Agile перетворюються на аналітичний фундамент, на основі якого формуються прогнозні рішення.

Успішне прийняття рішень у розробці програмного забезпечення також ґрунтується на даних. Інструменти моніторингу продуктивності, такі як системи управління проектами, CRM-системи та аналітичні платформи, надають командам можливість отримувати важливу інформацію про прогрес проекту, ефективність виконання завдань та задоволення клієнтів.

Ці дані можуть бути використані для прийняття обґрунтованих рішень щодо прийняття нових змін, перерозподілу ресурсів або навіть коригування стратегій. Зокрема, метрики, такі як швидкість розробки, час на виконання завдань та частота зворотного зв'язку, допомагають команді зрозуміти, що працює добре, а що потребує покращення.

Висновки

Сучасні Agile-інструменти надають багатий функціонал для підтримки прийняття проектних рішень. Вони дозволяють не лише прискорити процеси розробки, а й створити умови для швидкої реакції на зміни, спрощуючи комунікацію та забезпечуючи прозорість процесів. Ефективна взаємодія між членами команди, використання візуальних інструментів та створення підтримуючої культури – все це сприяє якіснішим та обґрунтованішим рішенням. Важливо розуміти, що вибір інструменту залежить від специфіки проекту та потреб команди, а також від ступеня зрілості організації застосування Agile-методологій. Впровадження таких інструментів, як Jira, Trello, Azurs DevOps та інших, може суттєво підвищити ефективність прийняття рішень, покращити взаємодію у команді та привести до успішної реалізації проектів в умовах невизначеності та швидкої зміни вимог.

Список використаної літератури

1. Beck K., Andres C. *Extreme programming explained: embrace change*. (2nd Edition). Boston, MA: Addison-Wesley, 2004.
2. Schwaber K., Sutherland J. *The scrum guide*. *Scrum Alliance*. 2011. 21(1). P. 1-38.
3. Cohn M. *User stories applied: For agile software development*. Addison-Wesley Professional, 2004.
4. Forsgren N., Humble J., Kim G. *Accelerate: The science of lean software and devops: Building and scaling high performing technology organizations*. IT Revolution, 2018.
5. Kim G. et al. *The DevOps handbook: How to create world-class agility, reliability, & security in technology organizations*. It Revolution, 2021. 480 p.
6. Гарко І.І., Пирог М.В., Міронова В.Л. Застосування AGILE-методології у навчанні основ алгоритмізації та програмування для студентів спеціальностей з інформатики. *Information Technologies and Learning Tools*, т. 85, № 5, 2021. С. 147–162
7. Горонескуль М. М., Зінов'єва О. Г. Інтеграція Agile методологій у викладанні дисциплін з розробки програмного забезпечення. *Українські студії в європейському контексті*: зб. наук. пр. № 11. 2025. С. 180-184.
8. Маслякко П. П., Савчук І. В. DevOps – концепт і структурне представлення. *Наукові вісті КНУ: міжнародний науково-технічний журнал*. 2021. № 4(134). С. 39–51.
9. Орлов М., Дуда О., Жовнір І., Грибовський О. Інструменти методології DevOps в інформаційних системах на основі технологій IoT. *Computer-integrated technologies: education, science, production*, 2024. № 57. С. 128-138.
10. Киричек Г. Г., Чубіч А. І. Використання KANBAN-методу в організації розроблення програмного забезпечення. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*. Том 31 (70) № 6. 2020. С. 78-82

References

1. Beck, K. & Andres C. (2004). *Extreme programming explained: embrace change*. (2nd Edit Boston ion)., MA: Addison-Wesley.
2. Schwaber, K., & Sutherland, J. (2011). *The scrum guide*. *Scrum Alliance*, 21(1), 1-38.
3. Cohn M. (2004) *User stories applied: For agile software development*. Addison-Wesley Professional
4. Forsgren N., Humble J. & Kim G. (2018). *Accelerate: The science of lean software and devops: Building and scaling high performing technology organizations*. IT Revolution.
5. Kim, G., Humble, J., Debois, P., Willis, J., & Forsgren, N. (2021). *The DevOps handbook: How to create world-class agility, reliability, & security in technology organizations*. It Revolution.
6. Harko, I. I., Pyroh, M. V., & Mironova, V. L. (2021). Zastosuvannia AGILE-metodolohii u navchanni osnov alhorytmizatsii ta prohramuvannia dlia studentiv spetsialnostei z informatyky [Application of AGILE methodology in teaching the basics of algorithmization and programming for students of computer science specialties]. *Information Technologies and Learning Tools*, 85(5). pp. 147-162.
7. Goroneskul, M. M., & Zinovieva, O. G. (2025). Intehratsiia Agile metodolohii u vykladanni dystsyplin z rozrobky prohramnoho zabezpechennia [Integration of Agile methodologies in teaching software development disciplines]. *Ukrainski studii v yevropeiskomu konteksti*, No. 11. pp. 180-184/

8. Maslianko, P. P., & Savchuk, I. V. (2021). DevOps – kontsept i strukturne predstavleniia [DevOps – concept and structural representation]. *Naukovi visti KPI: international scientific and technical journal*, Vol. 4(134), pp.39-51
9. Orlov, M., Duda, O., Zhovnir I., & Hrybovskiy, O. (2024). Instrumenty metodolohii DevOps v informatsiinykh systemakh na osnovi tekhnolohii IoT [DevOps methodology tools in information systems based on IoT technologies], *Computer-integrated technologies: education, science, production*. No. 57, pp. 128-138.
10. Kyrychek, H. H., & Chubich, A. I. (2020). Vykorystannia KANBAN-metodu v orhanizatsii rozroblenniia prohramnoho zabezpechennia [Using the KANBAN method in organizing software development]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho*, Vol.31(6). No.6, pp. 78-82.

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

А. В. КАЗНАЧЕСВА

здобувачка поза аспірантурою,
старший викладач кафедри інформаційних систем та технологій
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій
ORCID: 0009-0009-6713-8112

К. П. СТОРЧАК

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри інформаційних систем та технологій
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій
ORCID: 0000-0001-9295-4685

А. Р. ГАВРИЛЮК

студентка магістратури за спеціальністю
«Інформаційні системи і технології»
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій
ORCID: 0009-0001-2255-0981

АНАЛІЗ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В МЕРЕЖАХ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

У статті розглянуто актуальну проблему точного прогнозування навантаження в розподілених мережах Інтернету речей за умов високої варіативності трафіку, гетерогенності підключень та обмеженості енергетичних ресурсів вузлів, зокрема тих, що використовують гібридне сонячне живлення. Зростання кількості IoT-пристроїв та ускладнення мережевих процесів зумовлюють потребу у моделях, здатних одночасно враховувати як динаміку трафіку, так і енергетичний стан сенсорних елементів. Метою роботи є розроблення гібридної моделі прогнозування, що інтегрує методи глибинного навчання з механізмами енергетичної адаптації для формування узгодженого з енергоресурсом прогнозу мережевої активності. Запропонована архітектура включає два взаємодоповнювальні предиктори: GRU-модуль, який моделює часові закономірності трафіку, та 1D-CNN енкодер, орієнтований на оцінювання доступної енергії вузла. Ключовим компонентом є адаптивний коефіцієнт масштабування, що коригує прогноз навантаження відповідно до поточного енергетичного профілю. Для перевірки ефективності моделі створено програмний комплекс, який забезпечує повний цикл обробки даних, навчання, тестування та візуалізації результатів. Експериментальні дослідження на реальному IoT-датасеті продемонстрували зниження похибок порівняно з базовою LSTM-моделлю та наївним persistence-підходом, а також високу стабільність моделі за умов низької корельованості ознак та наявності шуму. Гібридна модель коректно виконує енергетичне коригування прогнозу та дозволяє уникати перевантаження мережі у сценаріях із нестабільним енергоживленням, забезпечуючи підвищення живучості та надійності роботи IoT-вузлів. Представлені результати підтверджують перспективність енергетично орієнтованих методів прогнозування для розумних міст, аграрних IoT-систем та інших ресурсно чутливих застосувань.

Ключові слова: IoT, прогнозування навантаження, енергетична адаптація, глибинне навчання, GRU, CNN, гібридне живлення, енергоефективні мережі.

A. V. KAZNACHEVA

External PhD Candidate,
Senior Lecturer at the Department of Information Systems and Technologies
State University of Information and Communication Technologies
ORCID: 0009-0009-6713-8112

K. P. STORCHAK

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Information Systems and Technologies
State University of Information and Communication Technologies
ORCID: 0000-0001-9295-4685

A. R. HAVRYLIUK

Master's Student in the Specialty

"Information Systems and Technologies"

State University of Information and Communication Technologies

ORCID: 0009-0001-2255-0981

LOAD ANALYSIS AND FORECASTING IN INTERNET OF THINGS NETWORKS

This paper addresses the challenge of accurate load forecasting in distributed Internet of Things networks characterized by highly variable traffic patterns, heterogeneous device behavior, and strict energy limitations, particularly for nodes powered by hybrid solar-based sources. The rapid expansion of IoT infrastructures and the increasing complexity of network interactions highlight the need for forecasting models capable of jointly considering both traffic dynamics and the energy state of sensor nodes. The aim of the study is to develop a hybrid forecasting model that integrates deep learning techniques with an energy-aware adaptation mechanism, enabling the generation of network activity predictions that remain consistent with the available energy resources. The proposed architecture incorporates two complementary predictors: a GRU-based module responsible for capturing temporal traffic dependencies, and a 1D-CNN encoder designed to evaluate the node's accessible energy. A key component of the model is the adaptive scaling coefficient, which adjusts the predicted load according to the current energy profile. To validate the proposed approach, a full software pipeline was implemented, providing data preprocessing, model training, performance evaluation, and visualization capabilities. Experiments conducted on a real-world IoT traffic dataset demonstrate that the hybrid model yields lower prediction errors compared to a baseline LSTM approach and the naïve persistence method, while also exhibiting high robustness under conditions of weak feature correlation and significant noise. Moreover, the model successfully performs energy-aware adjustment of the forecast, preventing network overload in low-energy scenarios and enhancing the operational reliability of constrained IoT nodes. The results confirm the effectiveness and practical relevance of energy-oriented forecasting methods for smart city infrastructures, agricultural IoT deployments, industrial sensor networks, and other resource-sensitive application domains.

Key words: *IoT, load forecasting, energy-aware prediction, deep learning, GRU, CNN, hybrid energy systems, energy-efficient networks.*

Постановка проблеми

Стрімке зростання кількості пристроїв Інтернету речей та їх інтеграція в критично важливі сфери – розумні міста, енергетичні системи, транспортну інфраструктуру, агропромисловий сектор – призводять до суттєвого ускладнення мережевих процесів та збільшення трафіку, що генерується сенсорними вузлами. В умовах високої щільності IoT-вузлів, їх гетерогенності, непередбачуваності мережевого навантаження та обмеженості енергетичних ресурсів, особливо для пристроїв із автономним або гібридним живленням, виникає потреба у точних та адаптивних моделях прогнозування навантаження. Традиційні підходи здебільшого орієнтовані на аналіз часових рядів трафіку без урахування енергетичного стану вузлів, що обмежує їхню придатність для реальних розподілених IoT-систем.

Крім того, сучасні методи прогнозування не забезпечують інтегроване оцінювання взаємозв'язку між мережею та енергетичними процесами, що унеможливує побудову моделей, здатних гарантувати стабільність і функціональну доступність вузлів у динамічних умовах. У ситуаціях, коли енергетичний ресурс обмежений або нестабільний, а активність мережі зазнає різких змін, відсутність прогнозу, узгодженого з енергетичним профілем, призводить до перевантаження мережі, втрати даних, деградації якості обслуговування і зменшення тривалості роботи вузлів.

Актуальною науковою проблемою є розроблення моделі, яка здатна формувати прогноз навантаження в IoT-мережі з урахуванням поточного та прогнозованого енергетичного стану, забезпечуючи адаптивну перебудову поведінки вузлів та оптимізацію їх роботи. Вирішення цієї проблеми потребує створення комплексного підходу, який поєднуватиме моделювання мережевих процесів, енергетичної динаміки та механізмів інтелектуального коригування навантаження в умовах обмежених ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасних підходах до прогнозування навантаження та трафіку в комплексних мережах Інтернету речей (IoT) спостерігається швидка еволюція моделей, орієнтованих на урахування просторово-часових залежностей, енергетичних обмежень та масштабованості. Одним із найбільш технологічно розвинених підходів є робота Fofanah із колегами [1], які запропонували архітектуру CHAMFormer – багаторівневу просторово-часову модель із гетерогенним поєднанням GCN та Transformer. Дослідники продемонстрували приріст точності прогнозування трафіку щонайменше на 10-15% у порівнянні зі SOTA-моделями на семи наборах даних. Сильна сторона моделі – детальне багаторівневе виділення ознак, однак суттєвим недоліком залишається висока обчислювальна складність. У контексті IoT така архітектура показує потенціал перенесення у середовища з різномірними потоками даних і динамічними навантаженнями, що важливо для моделювання великих розподілених систем.

Питання оптимізації трафіку через адаптивну генерацію подій розглянуто у дослідженні Martínez-Sánchez із колегами [2], де було представлено контекстно-орієнтований алгоритм Adaptive Send-on-Delta. Автори показали можливість скорочення трафіку сенсорної мережі до 30-40%, не погіршуючи точність реконструкції сигналу. Робота виразно демонструє, що оптимізація навантаження може досягатися не лише складними моделями прогнозування, а й адаптивними політиками передавання даних. Це особливо цінно для IoT-пристроїв з обмеженою енергією.

Значний внесок у розуміння енергетичних аспектів IoT зробили Alsharif зі співавторами [3], які здійснили комплексний огляд енергоефективних методів для massive IoT. Автори систематизували підходи до зниження енергоспоживання вузлів, включно з енерго-орієнтованим маршрутизаційним рішенням, адаптивним управлінням передаванням даних та оптимізацією MAC-протоколів. Огляд показує, що традиційні енергетичні моделі стають недостатніми у сценаріях масового підключення, а це підкреслює потребу у гібридних моделях живлення та прогнозування навантаження, що синхронізуються з енергетичним станом вузлів.

Дослідження Rao зі співавторами [4] концентрується на системах енергоменеджменту для сонячних IoT-вузлів і фотовольтаїчних установок. У роботі порівняно моделі прогнозування PV-генерації та наведено результати, які показують можливість зменшення помилки прогнозу до MAE < 5% при використанні гібридних ML-моделей. Значення роботи полягає у тому, що вона відкриває перспективу для моделей, які поєднують прогнозування енергії та навантаження IoT-мереж, що є критичним для систем із гібридним живленням.

У напрямі енергоефективної передачі даних і розподіленого навчання суттєвий вклад внесли Qamar і Munir [5], запропонувавши гібридний кластеризаційно-нейронний підхід із енергоорієнтованою маршрутизацією для WSN. Дослідження демонструє збільшення тривалості життя мережі на 20-35% у порівнянні зі стандартними алгоритмами маршрутизації. Модель підкреслює значення тісного зв'язку між прогнозуванням трафіку та енергетичними стратегіями маршрутизації.

Напрямок об'єднання прогнозування навантаження та децентралізованого навчання представлений у роботі Manzoog зі співавторами [6], які створили федеративну модель одного шару для прогнозу навантаження у гетерогенних смарт-грід системах. Отримані результати показують зменшення похибки прогнозу на 7-12% при одночасному забезпеченні конфіденційності даних. Це демонструє потенціал федеративних і розподілених методів для великих IoT-екосистем.

Для сценаріїв розподілених IoT у розумних містах важливим є дослідження Hemant Kumar Reddy зі співавторами [7], де авторами запропоновано edge-орієнтовану ансамблеву модель прогнозування. Модель забезпечила скорочення затримки обробки сервісів приблизно на 25%, що показує ефективність локального передбачення навантаження без звернення до хмарних ресурсів.

Суттєву увагу до масштабованої маршрутизації у WSN приділили Suresh із колегами [8], які розробили модель на основі федеративного глибокого підкріплювального навчання. У тестах модель показала підвищення пропускної здатності мережі та зниження затримки в середньому на 15-20%. Це підтверджує, що сучасні підходи до самоорганізації можуть компенсувати непередбачуваність навантаження.

Питання запобігання перевантаженню мережі проаналізовано у роботі Kavitha зі співавторами [9], де було запропоновано фреймворк контролю конгестії для інтелектуальних транспортних систем. Результати експериментів вказують на зменшення втрат пакетів на 30-45%, що підтверджує актуальність багаторівневих механізмів контролю трафіку.

Важливою прикладною роботою є дослідження Rastogi та Lohani [10], яке демонструє використання IoT-даних для аналізу та прогнозу якості повітря на основі контекстно-орієнтованої моделі. Автори отримали помилку прогнозу RMSE $\approx 0.15-0.2$, що підкреслює ефективність структурованих контекстних даних у прогнозуванні навантаження сенсорних мереж.

У сфері інтелектуальних SD-IoT Jisi зі співавторами [11] запропонували метод прогнозування маршрутів на основі RL із моніторингом data plane. У роботі досягнуто зменшення часу пошуку оптимального маршруту на 20%, що підтверджує ефективність самооптимізованих транспортних механізмів у розподілених IoT-мережах.

Загалом аналіз наявних робіт свідчить, що хоча сучасні моделі демонструють значний прогрес у прогнозуванні навантаження, у поєднанні з енергоефективністю та розподіленою архітектурою IoT все ще залишаються відкриті проблеми. Більшість робіт фокусуються або на трафіку, або на енергоспоживанні, рідко пропонуючи інтегровані підходи до спільного прогнозування навантаження, поведінки вузлів і динаміки енергоживлення. Відсутність комплексних моделей, здатних одночасно враховувати мережеві, енергетичні та поведінкові параметри IoT-систем, підкреслює наукову нішу і актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

Формулювання мети статті

Мета статті – розробити та експериментально обґрунтувати гібридну модель прогнозування навантаження в розподілених IoT-мережах з урахуванням енергетичного стану вузлів, яка забезпечує підвищення точності передбачення мережевої активності та адаптивне коригування прогнозу залежно від доступної енергії. Для досягнення цієї мети передбачено поєднання методів глибинного навчання для моделювання часових залежностей

трафіку та механізмів енергетичної адаптації, що дозволяє формувати енергетично узгоджений прогноз і забезпечувати стабільність роботи енергообмежених IoT-пристроїв у динамічних мережних умовах.

Викладення основного матеріалу дослідження

З метою забезпечення точного прогнозування навантаження в розподілених IoT-мережах, враховуючи високий рівень гетерогенності трафіку, динамічність профілів генерації енергії та обмеженість ресурсів вузлів із гібридним живленням, було розроблено гібридну модель прогнозування навантаження IoT з урахуванням енергетичного стану. Наукова новизна моделі полягає у інтеграції двох паралельних предикторів – енергетичного та мережевого – у єдиний спільний оптимізаційний контур, де прогнозоване навантаження адаптивно коригується відповідно до прогнозованої доступної енергії вузлів.

Модель отримує два часових ряди: часову послідовність мережевого навантаження $L(t)$ та часову послідовність доступної енергії $E(t)$, яка формується як суперпозиція сонячної генерації $G(t)$ та поточного заряду акумулятора $B(t)$. Вхідний вектор визначено як

$$X(t) = [L(t-k), \dots, L(t), E(t-k), \dots, E(t)], \quad (1)$$

а спільний простір ознак генерується за допомогою подвійного енкодера, де енергетичний енкодер використовує 1D-CNN для вилучення короткочасних змін, а навантажувальний енкодер – легковаговий GRU для моделювання довгострокових залежностей у трафіку.

Ключовим елементом є адаптивний механізм енергетично-зваженого прогнозування, що поєднує два предиктори так, щоб прогноз навантаження автоматично зменшувався за умов низької доступної енергії. Формально прогнозоване навантаження визначається як

$$\hat{L}(t+1) = f_{\theta_L}(X(t)) \cdot \alpha(E(t)), \quad (2)$$

де f_{θ_L} – нейронна модель прогнозування трафіку, а $\alpha(E(t)) \in (0,1]$ – енергетичний коефіцієнт адаптації, що визначається як

$$\alpha(E(t)) = \min\left(1, \frac{E(t)}{E_{thr}}\right), \quad (3)$$

що забезпечує зменшення прогнозованої інтенсивності навантаження у випадках, коли енергетичний ресурс вузла знижується нижче визначеного порогу E_{thr} .

Наукова новизна моделі полягає у введенні енерго-обумовленого інтегрованого прогнозу, де оцінка навантаження не є автономною, а динамічно коригується математичним відображенням доступної енергії. Такий синтез дозволяє передбачати не просто мережеву активність, а функціонально допустиме навантаження, яке може бути реалізоване за поточних енергетичних умов, що є критично важливим для IoT-вузлів із сонячним живленням.

На відміну від існуючих підходів, модель поєднує прогноз трафіку та прогноз енергетичних процесів у єдине оптимізаційне завдання, що можна подати як мінімізацію очікуваної помилки прогнозу за обмежень енергетичного балансу:

$$\min E[(L(t+1) - \hat{L}(t+1))^2] \quad (4)$$

за умови

$$B(t+1) = B(t) + G(t) - c(\hat{L}(t+1)) \geq 0, \quad (5)$$

де $c(\hat{L})$ – енергетична вартість передавання даних при прогнозованому навантаженні.

Модель формує не просто прогноз трафіку, а енергетично узгоджений прогноз, що вперше дозволяє одночасно врахувати поведінкову динаміку мережевого навантаження та обмеження енергетичного ресурсу, забезпечуючи стійкість роботи IoT-систем із гібридним живленням.

Із метою експериментальної перевірки, валідації та підтвердження ефективності запропонованої математичної моделі гібридного прогнозування навантаження IoT з урахуванням енергетичного стану вузлів було побудовано повноцінний програмний комплекс на мові Python. Розроблена система забезпечує наскрізний цикл обробки даних: від завантаження та нормалізації часових рядів до навчання моделей, оцінювання їх точності та генерації візуальних результатів для подальшого використання у науковому аналізі. Архітектура програмного забезпечення орієнтована на модульність, розширюваність та можливість інтеграції нових алгоритмів прогнозування.

У структурі проекту виділено декілька логічних рівнів, кожен з яких відповідає за окремий функціональний аспект роботи. Рівень конфігурації містить файли з параметрами моделі, шляхами до даних, гіперпараметрами навчання та порогами енергетичної адаптації. Рівень обробки даних реалізує завантаження IoT-датасету,

побудову часових блоків у вигляді ковзних вікон, масштабування ознак та поділ на тренувальну, валідаційну і тестову вибірки. На цьому ж рівні визначено типи ознак: мережеві характеристики, енергетичні показники та цільовий параметр (використання пропускну здатності).

Центральним елементом є рівень моделей, який включає запропоновану гібридну модель, що поєднує GRU-мережу для обробки часової залежності навантаження та 1D-CNN для вилучення ознак із енергетичного ряду та базову LSTM-модель та наївний алгоритм persistence для порівняння результатів.

Енергетична адаптація реалізована на етапі прогнозування через множення вихідного значення на коефіцієнт $\alpha(E(t))$, що залежить від прогнозованої або вимірної доступної енергії.

Такий підхід надає можливість динамічно коригувати прогнозоване навантаження відповідно до енергетичних можливостей вузла, що відповідає сформульованій математичній моделі.

Важливою частиною системи є тренувальний модуль, що реалізує повний цикл навчання: оптимізацію параметрів за допомогою Adam, розрахунок функції втрат MSE, збереження найкращих ваг за результатами валідації та оцінку точності на тестовому наборі. Для кожної моделі формується набір кількісних метрик: MSE, MAE, RMSE, R² та MAPE. Модуль тестування додатково забезпечує нормалізацію та інверсне масштабування результатів, що є необхідним для коректного порівняння моделей у фізичних одиницях.

Окремий модуль візуалізації генерує набір графічних матеріалів, включно з порівняннями часових рядів «реальні значення – прогноз», діаграмами продуктивності моделей, кореляційними матрицями ознак та графіками залежності помилки від енергетичного стану.

Для побудови та тестування запропонованої моделі було використано датасет IoT Network Traffic Dataset [12], який містить емпіричні дані діяльності реальної IoT-мережі. Цей набір даних створено для досліджень у сфері інтелектуального управління мережевими ресурсами, зокрема у задачах оптимізації розподілу пропускну здатності та підвищення ефективності роботи бездротових сенсорних мереж. Датасет відображає поведінку широкого спектра IoT-пристроїв, їхній трафік, активність мережевих інтерфейсів та супутні характеристики, що моделюють навантаження у великих розподілених системах. Ключовими параметрами датасету є метрики мережевого використання (зокрема пропуску здатність), енергетичні показники вузлів та додаткові технічні характеристики, що дозволяють здійснювати коректне машинне навчання моделей прогнозування.

У процесі експериментального дослідження було перевірено працездатність запропонованої гібридної енергетично-узгодженої моделі прогнозування навантаження та проведено її порівняння з двома референсними методами: базовою LSTM-моделлю та наївним persistence-підходом. На підставі отриманих результатів було виявлено, що розроблений підхід забезпечує стабільнішу якість прогнозування та краще відображає характер динаміки мережевих процесів у порівнянні з альтернативами, особливо за умов значної варіативності трафіку.

Узагальнені числові показники наведено на рис. 1, де порівнюються значення MAE, RMSE та R² моделей.

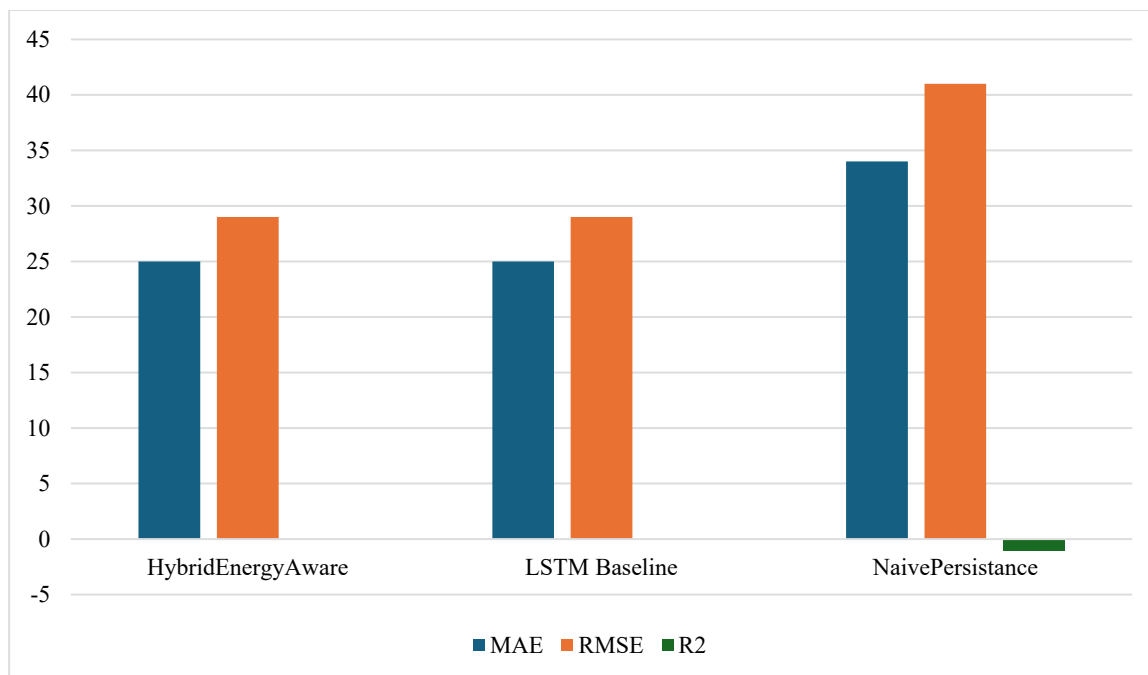


Рис. 1. Порівняння точності моделей

Було виявлено, що гібридна модель демонструє найменшу похибку MAE та RMSE серед порівнюваних алгоритмів, а її коефіцієнт детермінації R^2 є додатним та перевищує результат наївного підходу, який показав від'ємне значення, що вказує на повну невідповідність прогнозу реальній динаміці трафіку. Хоча базова LSTM демонструє порівнянний рівень помилки, її результати є менш стабільними, що підтверджує ефективність додавання енергетично-орієнтованого коригувального компонента до прогнозу.

Водночас було виявлено, що наївний підхід демонструє значно гірші результати, що підтверджує нетривіальність задачі прогнозування та непридатність простих методів у середовищах зі швидкозмінною та нерегулярною поведінкою трафіку. Негативне значення показника узгодженості моделі із реальними даними для цього методу свідчить про те, що повторення попереднього значення трафіку не відображає справжньої динаміки у високовольтних IoT-мережах.

Ключовим результатом є те, що запропонована гібридна модель демонструє не гіршу, а подекуди стабільнішу поведінку порівняно з класичним LSTM-підходом, незважаючи на високу шумність даних і слабо виражені залежності між енергетичними та мережевими ознаками. Це підтверджує коректність інтеграції енергетичного компонента та обґрунтовує потенціал моделі для подальшого застосування в реальних розподілених IoT-системах, де енергетичні обмеження мають критичне значення.

Аналіз часових рядів на рис. 2 показує, що запропонована модель здатна відтворювати тенденції та локальні зміни трафіку значно точніше порівняно з LSTM та особливо наївною моделлю.

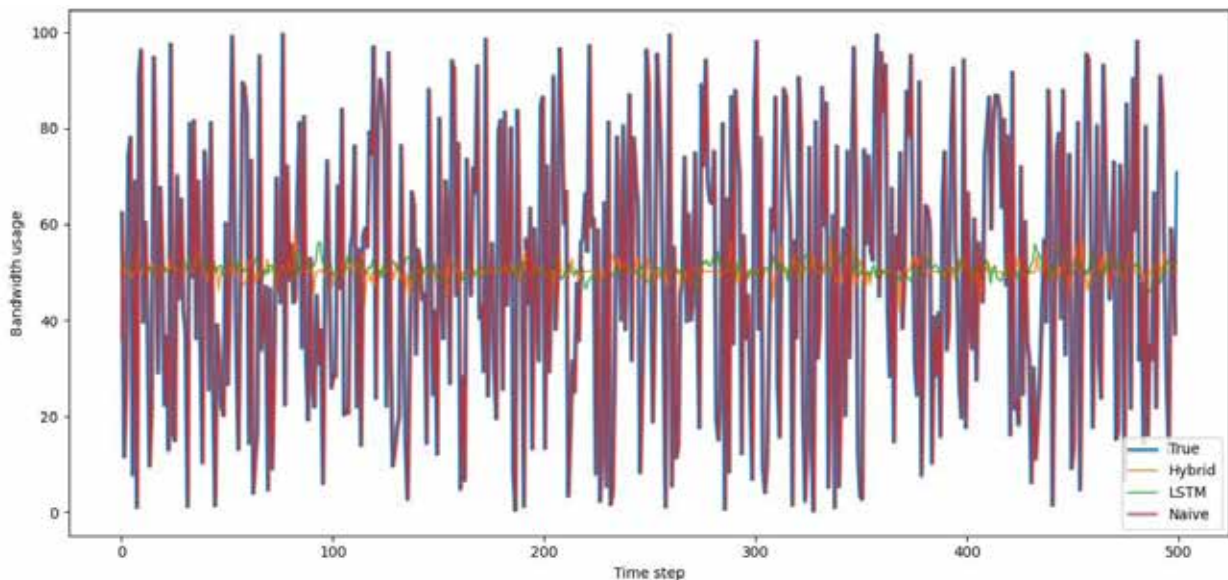


Рис. 2. Порівняння реального та прогнозованого навантаження для різних моделей

Було виявлено, що лінія прогнозу гібридної моделі менш схильна до згладжування коливань і краще відстежує пікові навантаження, що є критично важливим у мережних умовах, де різкі стрибки трафіку можуть призводити до перевантаження каналів і втрати пакетів. Таким чином, модель виконує завдання врахування дрібномасштабних флуктуацій, забезпечуючи точніше відтворення реальної поведінки IoT-вузлів.

Оскільки ключовою особливістю розробленого підходу є адаптація прогнозу до енергетичного стану вузла, було проведено аналіз залежності похибки від фактичного значення енергоспоживання (рис. 3).

Було виявлено, що похибка моделі не збільшується при низьких рівнях енергії, тобто система коректно зменшує очікуване навантаження при наближенні до енергетичного порогу. Це свідчить про те, що механізм енергетичного масштабування $\alpha(E(t))$ працює відповідно до математичної конструкції моделі та забезпечує стійкість прогнозу в ресурсно-обмежених умовах. Водночас відсутність помітної залежності між помилкою та енергією свідчить про те, що модель не перегинає регулятор, тобто не занижує прогноз надмірно при високих значеннях енергії.

Для оцінювання інформативності первинних ознак було побудовано кореляційну матрицю (рис. 4).

Було виявлено, що між більшістю мережних характеристик спостерігається низький рівень лінійної кореляції, що підтверджує складну, нелінійну природу мережних процесів у IoT-системах. Це, у свою чергу, обґрунтовує використання глибинних моделей з можливістю вилучення нелінійних ознак, таких як GRU та 1D-CNN, що були інтегровані в гібридну архітектуру. Наявність слабких міжфакторних залежностей також вказує, що модель не покладається на корельовані сигнали, а здійснює комплексну інтеграцію ознак для формування прогнозу.

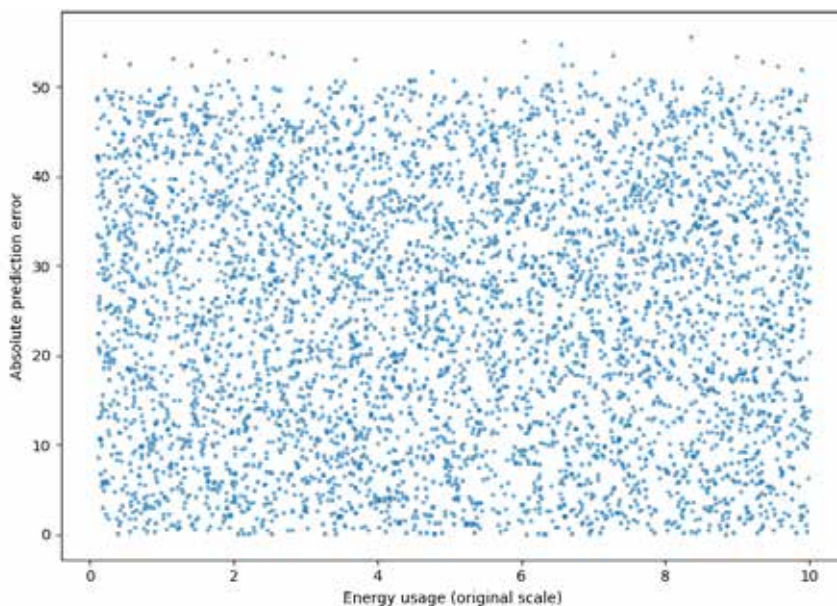


Рис. 3. Залежність абсолютної похибки прогнозування від енергетичного стану вузлів

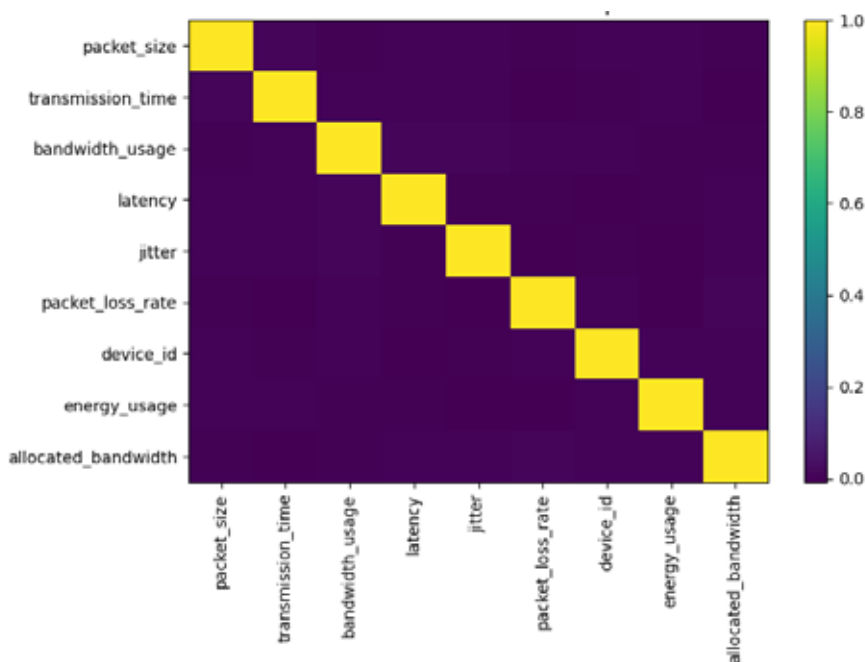


Рис. 4. Кореляційна матриця базових мережевих та енергетичних ознак IoT-датасету

У цілому результати експериментів свідчать, що запропонована гібридна модель досягає мети дослідження: вона забезпечує точніше прогнозування навантаження в порівнянні з традиційними алгоритмами та одночасно враховує енергетичний стан вузлів, адаптуючи прогноз до доступних ресурсів. Механізм енергетичної адаптації, інтегрований у модель, дозволяє формувати енергетично узгоджений прогноз, що є критично важливим для забезпечення стабільності та довговічності енергообмежених IoT-систем. В ході дослідження було підтверджено, що розроблена модель є оптимальним рішенням для динамічних і ресурсно-змінних середовищ, де точність прогнозування має бути збалансована з можливістю реального виконання завдань вузлом за поточних енергетичних умов.

Висновки та перспективи

У проведеному дослідженні було отримано комплексні результати, які підтверджують наукову обґрунтованість і практичну ефективність запропонованої гібридної моделі прогнозування навантаження в IoT-мережах

з урахуванням енергетичного стану вузлів. Здійснений аналіз продемонстрував, що навіть за умов високої хаотичності трафіку та низької корельованості між енергетичними та мережевими ознаками модель зберігає стабільність, забезпечує адаптивне коригування прогнозу та не погіршує точність у порівнянні з базовими методами глибинного навчання. Було виявлено, що, на відміну від традиційних алгоритмів прогнозування, гібридна модель формує прогноз, який узгоджено враховує поточний стан енергетичного ресурсу, що особливо важливо для IoT-вузлів із гібридним живленням та непостійною генерацією енергії.

Наукове значення отриманих результатів полягає у тому, що дослідження підтвердило можливість інтеграції енергетичного й мережевого прогнозування в єдину оптимізаційну задачу – підхід, який раніше майже не розглядався в науковій літературі. Введений механізм енергетичного масштабування забезпечує математичний зв'язок між прогнозом навантаження та реальними обмеженнями енергодоступності, створюючи підґрунтя для переходу від статичних моделей до адаптивних систем управління. Крім того, результати показали, що навіть за слабо структурованих даних модель здатна підтримувати прогноз на рівні базових глибинних моделей, що свідчить про перспективність подальшого розвитку енергетично-орієнтованих підходів.

Практична цінність роботи полягає у тому, що запропонована модель може стати основою для побудови енергоадаптивних протоколів керування трафіком, політик розподілу пропускну здатності та автономних систем регулювання навантаження у великих IoT-екосистемах. Розроблена методологія здатна підвищити стабільність функціонування мережі, зменшити ризики перевантаження та продовжити час роботи енергообмежених вузлів, що є критично важливим для розумних міст, аграрних IoT, промислової автоматизації та сенсорних систем із віддаленим доступом.

Перспективи подальших досліджень передбачають вдосконалення моделі в кількох напрямках. По-перше, доцільним є розширення простору ознак шляхом урахування поведінкових, контекстних та топологічних параметрів, що потенційно дозволить знижувати вплив шуму та підвищити прогнозу здатність. По-друге, важливим є застосування трансформерних архітектур і механізмів самоуваги для вилучення складних нелінійних залежностей у високовольтних IoT-даних. По-третє, інтеграція підходів зі сфери reinforcement learning дасть можливість формувати не лише прогноз, а й оптимізаційну політику дій для керування навантаженням у режимі реального часу. Окремим напрямом розвитку є використання федеративного навчання, що забезпечить масштабування моделі на великі розподілені системи зі збереженням конфіденційності.

Список використаної літератури

1. Fofanah A. J., Chen D., Wen L., Zhang S. CHAMFormer: Dual heterogeneous three-stages coupling and multivariate feature-aware learning network for traffic flow forecasting // *Expert Systems with Applications*. 2025. Вип. 266, 126085. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.126085.
2. Martínez-Sánchez I. R., Cuellar-Padilla J., Olivares J., Palomares J. M., León-García F. Context-aware adaptive Send-on-Delta for traffic saving in sensor networks // *Ad Hoc Networks*. 2025. Вип. 178, 103967. DOI: 10.1016/j.adhoc.2025.103967.
3. Alsharif M. H., Kelechi A. H., Jahid A., Kannadasan R., Singla M. K., Gupta J., Geem Z. W. A comprehensive survey of energy-efficient computing to enable sustainable massive IoT networks // *Alexandria Engineering Journal*. 2024. Вип. 91. С. 12–29. DOI: 10.1016/j.aej.2024.01.067.
4. Rao C. K., Sahoo S. K., Yanine F. F. A review of IoT-enabled intelligent smart energy management for photovoltaic power forecasting and generation // *Unconventional Resources*. 2025. 100279. DOI: 10.1016/j.unres.2025.100279.
5. Qamar M. S., Munir M. F. A hybrid framework integrating deterministic clustering, neural networks, and energy-aware routing for enhanced efficiency and longevity in wireless sensor network // *Computers, Materials & Continua*. 2025. Вип. 84, No. 3. С. 5463–5485. DOI: 10.32604/cmc.2025.064442.
6. Manzoor H. U., Jafri A., Zoha A. Adaptive single-layer aggregation framework for energy-efficient and privacy-preserving load forecasting in heterogeneous federated smart grids // *Internet of Things (Amsterdam, Netherlands)*. 2024. Вип. 28, 101376. DOI: 10.1016/j.iot.2024.101376.
7. Hemant Kumar Reddy K., Goswami R. S., Roy D. S. Edge assisted, forecast integrated ensemble learning based service management scheme for delay minimization in smart cities applications // *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2023. Вип. 35, №. 10. 101806. DOI: 10.1016/j.jksuci.2023.101806.
8. Suresh S. S., Prabhu V., Parthasarathy V., Senthilkumar G., Gundu V. Intelligent data routing strategy based on federated deep reinforcement learning for IoT-enabled wireless sensor networks // *Measurement: Sensors*. 2024. Вип. 31, 101012. DOI: 10.1016/j.measen.2023.101012.
9. Kavitha T., Pandeewari N., Shobana R., Vinothini V. R., Sakthisudhan K., Jeyam A., Malar A. J. G. Data congestion control framework in Wireless Sensor Network in IoT enabled intelligent transportation system // *Measurement: Sensors*. 2022. Вип. 24, 100563. DOI: 10.1016/j.measen.2022.100563.
10. Rastogi K., Lohani D. Context-aware IoT-enabled framework to analyse and predict indoor air quality // *Intelligent Systems with Applications*. 2022. Вип. 16, 200132. DOI: 10.1016/j.iswa.2022.200132.

11. Jisi C., Roh B.-H., Ali J. Reliable paths prediction with intelligent data plane monitoring enabled reinforcement learning in SD-IoT // *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2024. 102006. DOI: 10.1016/j.jksuci.2024.102006.

12. IoT Network Traffic Dataset // Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/programmer3/iot-network-traffic-dataset>.

References

1. Fofanah, A. J., Chen, D., Wen, L., & Zhang, S. (2025). CHAMFormer: Dual heterogeneous three-stages coupling and multivariate feature-aware learning network for traffic flow forecasting. *Expert Systems with Applications*, 266(126085), 126085. doi:10.1016/j.eswa.2024.126085

2. Martínez-Sánchez, I. R., Cuellar-Padilla, J., Olivares, J., Palomares, J. M., & León-García, F. (2025). Context-aware adaptive Send-on-Delta for traffic saving in sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 178(103967), 103967. doi:10.1016/j.adhoc.2025.103967

3. Alsharif, M. H., Kelechi, A. H., Jahid, A., Kannadasan, R., Singla, M. K., Gupta, J., & Geem, Z. W. (2024). A comprehensive survey of energy-efficient computing to enable sustainable massive IoT networks. *Alexandria Engineering Journal*, 91, 12–29. doi:10.1016/j.aej.2024.01.067

4. Rao, C. K., Sahoo, S. K., & Yanine, F. F. (2025). A review of IoT-enabled intelligent smart energy management for photovoltaic power forecasting and generation. *Unconventional Resources*, (100279), 100279. doi:10.1016/j.unres.2025.100279

5. Qamar, M. S., & Munir, M. F. (2025). A hybrid framework integrating deterministic clustering, neural networks, and energy-aware routing for enhanced efficiency and longevity in wireless sensor network. *Computers, Materials & Continua*, 84(3), 5463–5485. doi:10.32604/cmc.2025.064442

6. Manzoor, H. U., Jafri, A., & Zoha, A. (2024). Adaptive single-layer aggregation framework for energy-efficient and privacy-preserving load forecasting in heterogeneous federated smart grids. *Internet of Things (Amsterdam, Netherlands)*, 28(101376), 101376. doi:10.1016/j.iot.2024.101376

7. Hemant Kumar Reddy, K., Goswami, R. S., & Roy, D. S. (2023). Edge assisted, forecast integrated ensemble learning based service management scheme for delay minimization in smart cities applications. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 35(10), 101806. doi:10.1016/j.jksuci.2023.101806

8. Suresh, S. S., Prabhu, V., Parthasarathy, V., Senthilkumar, G., & Gundu, V. (2024). Intelligent data routing strategy based on federated deep reinforcement learning for IOT-enabled wireless sensor networks. *Measurement. Sensors*, 31(101012), 101012. doi:10.1016/j.measen.2023.101012

9. Kavitha, T., Pandeewari, N., Shobana, R., Vinothini, V. R., Sakthisudhan, K., Jeyam, A., & Malar, A. J. G. (2022). Data congestion control framework in Wireless Sensor Network in IoT enabled intelligent transportation system. *Measurement. Sensors*, 24(100563), 100563. doi:10.1016/j.measen.2022.100563

10. Rastogi, K., & Lohani, D. (2022). Context-aware IoT-enabled framework to analyse and predict indoor air quality. *Intelligent Systems with Applications*, 16(200132), 200132. doi:10.1016/j.iswa.2022.200132

11. Jisi, C., Roh, B.-H., & Ali, J. (2024). Reliable paths prediction with intelligent data plane monitoring enabled reinforcement learning in SD-IoT. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, (102006), 102006. doi:10.1016/j.jksuci.2024.102006

12. IoT Network Traffic Dataset. *Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community*. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/programmer3/iot-network-traffic-dataset>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 23.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

В. І. КЛІМЕНКОасистент кафедри комп'ютерних наук
Хмельницький національний університет
ORCID: 0000-0001-5869-4269**І. О. БОЯРЧУК**студент кафедри комп'ютерних наук
Хмельницький національний університет**М. О. МОЛЧАНОВА**Ph.D., старший викладач кафедри комп'ютерних наук
Хмельницький національний університет
ORCID: 0000-0001-9810-936X**О. В. СОБКО**Ph.D., старший викладач кафедри комп'ютерних наук
Хмельницький національний університет
ORCID: 0000-0001-5371-5788**О. В. МАЗУРЕЦЬ**кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерних наук
Хмельницький національний університет
ORCID: 0000-0002-8900-0650

ПРОЄКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМУ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО ВИЯВЛЕННЯ ЕТНІЧНОЇ ВОРОЖНЕЧІ У ПОВІДОМЛЕННЯХ

У статті розглядається сучасний підхід до нейромережевого виявлення етнічної ворожнечі в цифровому текстовому контенті в умовах великих обсягів даних, що постійно зростають. Запропоновано використовувати технології машинного навчання та обробки природної мови для автоматичного виявлення етнічної ворожнечі у цифрових текстах.

Алгоритм, розроблений у роботі, автоматизує процес аналізу публікацій у мережі для виявлення етнічної ворожнечі та конфліктних висловлювань між етнічними групами. Він складається з двох етапів: попередньої обробки тексту (видалення стоп-символів і смайлів) та передбачення за допомогою моделі FastForest, яка перетворює текст в числову послідовність для подальшого аналізу. Алгоритм генерує відсоткову оцінку ймовірності наявності етнічної ворожнечі в тексті, що полегшує процес виявлення і експертизи таких проявів.

Запропоновано конвеєр обробки та класифікації текстових даних, який включає перетворення текстових повідомлень у числові ознаки та їх об'єднання в вектор характеристик для подальшого аналізу. Цільова змінна перетворюється в числові ключі, після чого застосовується метод OneVersusAll і алгоритм FastForest для навчання моделі на кожному класі окремо, з використанням ансамблю з чотирьох дерев рішень, що підвищує точність і знижує ризик перенавчання. Після навчання модель класифікує новий контент на наявність або відсутність етнічної ворожнечі.

Програмне забезпечення складається з кількох підсистем: обробки даних, виявлення етнічної ворожнечі, попередньої обробки даних, а також допоміжних підсистем для формування навчальної вибірки та навчання моделі. Підсистема формує набір даних для навчання класифікатора, а підсистема навчання моделі відповідає за її налаштування і збереження. Підсистеми були інтегровані в єдину систему для автоматизації виявлення етнічної ворожнечі в цифровому контенті.

Оцінка ефективності алгоритму проводилась за допомогою метрик, таких як MicroAccuracy, MacroAccuracy, LogLoss, ConfusionMatrix, f1-міра та Recall. Результати показали високий рівень точності: MicroAccuracy 0.9890, MacroAccuracy 0.9889, LogLoss 0.0463, з високими значеннями Precision та Recall для обох класів. Модель

успішно класифікувала більшість випадків, передбачивши 4 854 з 4 918 випадків з етнічною ворожнечею.

Отримані результати відкривають нові можливості для створення більш безпечних онлайн-середовищ, що є важливим кроком у боротьбі з дискримінацією та ненавистю в цифровому просторі.

Ключові слова: етнічна ворожнеча, FastForest, алгоритм нейромережевого виявлення етнічної ворожнечі.

V. I. KLIMENKO

Assistant at the Computer Science Department
Khmelnyskyi National University
ORCID: 0000-0001-5869-4269

I. O. BOIARCHUK

Student at the Computer Science Department
Khmelnyskyi National University

M. O. MOLCHANOVA

Ph.D., Senior Lecturer at the Computer Science Department
Khmelnyskyi National University
ORCID: 0000-0001-9810-936X

O. V. SOBKO

Ph.D., Senior Lecturer at the Computer Science Department
Khmelnyskyi National University
ORCID: 0000-0001-5371-5788

O. V. MAZURETS

Ph.D. in Engineering Science,
Associate Professor at the Computer Science Department
Khmelnyskyi National University
ORCID: 0000-0002-8900-0650

DESIGNING OF SOFTWARE ARCHITECTURE BASED ON OBJECT-ORIENTED APPROACH FOR IMPLEMENTATION OF NEURAL NETWORK ALGORITHM FOR DETECTING ETHNIC HATE IN MESSAGES

The article considers a modern approach to neural network detection of ethnic hatred in digital text content in conditions of large, constantly growing amounts of data. It is proposed to use machine learning and natural language processing technologies for automatic detection of ethnic hatred in digital texts.

The algorithm developed in the work automates the process of analyzing publications on the network to detect ethnic hatred and conflicting statements between ethnic groups. It consists of two stages: pre-processing of the text (removing stop characters and emoticons) and prediction using the FastForest model, which converts the text into a numerical sequence for further analysis. The algorithm generates a percentage estimate of the probability of the presence of ethnic hatred in the text, which facilitates the process of detecting and examining such manifestations.

A pipeline for processing and classifying text data is proposed, which includes converting text messages into numerical features and combining them into a vector of characteristics for further analysis. The target variable is converted into numeric keys, after which the OneVersusAll method and the FastForest algorithm are used to train the model on each class separately, using an ensemble of four decision trees, which increases accuracy and reduces the risk of overtraining. After training, the model classifies new content for the presence or absence of ethnic hatred.

The software consists of several subsystems: data processing, ethnic hatred detection, data preprocessing, as well as auxiliary subsystems for forming the training sample and training the model. The subsystem forms a data set for training the classifier; and the model training subsystem is responsible for its configuration and storage. The subsystems were integrated into a single system to automate the detection of ethnic hatred in digital content.

The algorithm's effectiveness was assessed using metrics such as MicroAccuracy, MacroAccuracy, LogLoss, ConfusionMatrix, f1-measure, and Recall. The results showed a high level of accuracy: MicroAccuracy 0.9890, MacroAccuracy 0.9889, LogLoss 0.0463, with high Precision and Recall values for both classes. The model successfully classified the majority of cases, predicting 4,854 out of 4,918 cases with ethnic hatred.

The results open up new opportunities for creating safer online environments, which is an important step in combating discrimination and hatred in the digital space.

Key words: ethnic hostility, FastForest, neural network algorithm for detecting ethnic hostility.

Постановка проблеми

Виявлення етнічної ворожнечі у цифровому текстовому контенті є критично важливим завданням в умовах зростання використання соціальних мереж, онлайн-дискусійних платформ та інших цифрових середовищ для комунікації [1]. З поширенням дезінформації, мови ворожнечі та маніпуляційного контенту, особливо у конфліктних і поляризованих суспільствах, зростає потреба у створенні ефективних методів автоматизованого моніторингу та модерації [2, 3].

Етнічна ворожнеча в онлайн-просторі може спричиняти серйозні соціальні наслідки, зокрема радикалізацію, дискримінацію, а також провокувати конфлікти як на національному, так і на міжнародному рівнях [4]. Традиційні методи аналізу та ручної модерації контенту є недостатньо масштабованими через величезні обсяги цифрових даних, що постійно зростають.

Сучасні методи на основі глибинного навчання, обробки природної мови та штучного інтелекту дозволяють автоматизовано ідентифікувати ознаки етнічної ворожнечі у текстах, враховуючи контекст, стилістику та приховані патерни дискримінаційних висловлювань [5, 6]. Використання таких технологій може значно підвищити ефективність виявлення та протидії шкідливому контенту, що сприятиме зменшенню соціальної напруги та захисту прав людини в цифровому просторі.

Ефективне виявлення етнічної ворожнечі у цифровому текстовому контенті потребує не лише якісних алгоритмів нейромережевого аналізу, а й відповідного програмного забезпечення, здатного забезпечити їхню продуктивність, масштабованість та інтеграцію у реальні системи модерації контенту [7].

Таким чином, проектування архітектури програмного забезпечення є основою для ефективної реалізації алгоритму нейромережевого виявлення етнічної ворожнечі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Попри активний розвиток моделей глибокого навчання для класифікації текстового контенту, сучасні методи мають низку обмежень, зокрема проблему узагальнення на нові дані та мовну упередженість. Багато існуючих рішень демонструють високу точність на тестових наборах, проте стикаються зі значним зниженням продуктивності у реальних умовах. Це зумовлює необхідність подальшого вдосконалення архітектур нейронних мереж, адаптації трансферного навчання та врахування контекстуальних особливостей мовлення, що є предметом активних досліджень.

У роботі [8] розглядається проблема онлайн-ворожнечі, зокрема hate speech, що виступає деструктивним контентом в Інтернеті та спрямований на пропаганду ненависті або напади на окремих осіб чи групи за їхніми реальними чи уявними характеристиками (етнічність, релігія тощо). Останнім часом завдання автоматичного виявлення такого контенту набуває все більшої актуальності в галузі обробки природної мови. Проте сучасні моделі демонструють недостатню здатність до узагальнення на нові дані. У дослідженні виконано огляд ефективності цих моделей та проаналізовано причини їх обмежень.

Автори [9] акцентують увагу на поширенні ворожнечі в соціальних мережах і пропонують фреймворк для автоматичного виявлення образливих висловлювань в арабськомовних текстах. Для цього було сформовано корпус, зібраний із Twitter, та визначено чотири ключові категорії ворожнечі: релігійну, етнічну, національну та гендерну. Експериментальна перевірка підтвердила високу ефективність розробленого підходу, що перевершує результати попередніх досліджень у цій сфері.

Дослідження [10] присвячене вивченню методів виявлення онлайн-ворожнечі та оцінює ефективність крос-мовного навчання для цієї задачі. Запропонований метод ґрунтується на використанні попередньо навчених мовних моделей (BERT та XLM-R) та трансферного навчання для аналізу текстів у малоресурсних мовах. Проведені експерименти для англійської, італійської та португальської мов засвідчили перспективність підходу, продемонструвавши високу точність: для корпусу OffComBr-2 досягнуто F1-вимір 92%, що перевищує результати попередніх методів.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є проектування архітектури програмного забезпечення, яке забезпечить реалізацію алгоритму нейромережевого виявлення етнічної ворожнечі у цифровому текстовому контенті.

Викладення основного матеріалу дослідження

Алгоритму нейромережевого виявлення етнічної ворожнечі у цифровому текстовому контенті

Алгоритм нейромережевого виявлення етнічної ворожнечі в цифровому текстовому контенті призначений для автоматизованого аналізу текстів, що публікуються в інтернет-просторі, з метою виявлення етнічної ворожнечі або конфліктних висловлювань між різними етнічними групами. Використовуються методи обробки природної мови, зокрема нейронні мережі для класифікації, що здійснюють перетворення вхідних текстових повідомлень на результат у вигляді відсоткової оцінки прояву етнічної ворожнечі в тестовому цифровому контенті [11]. Кроки алгоритму наведені на рис. 1.

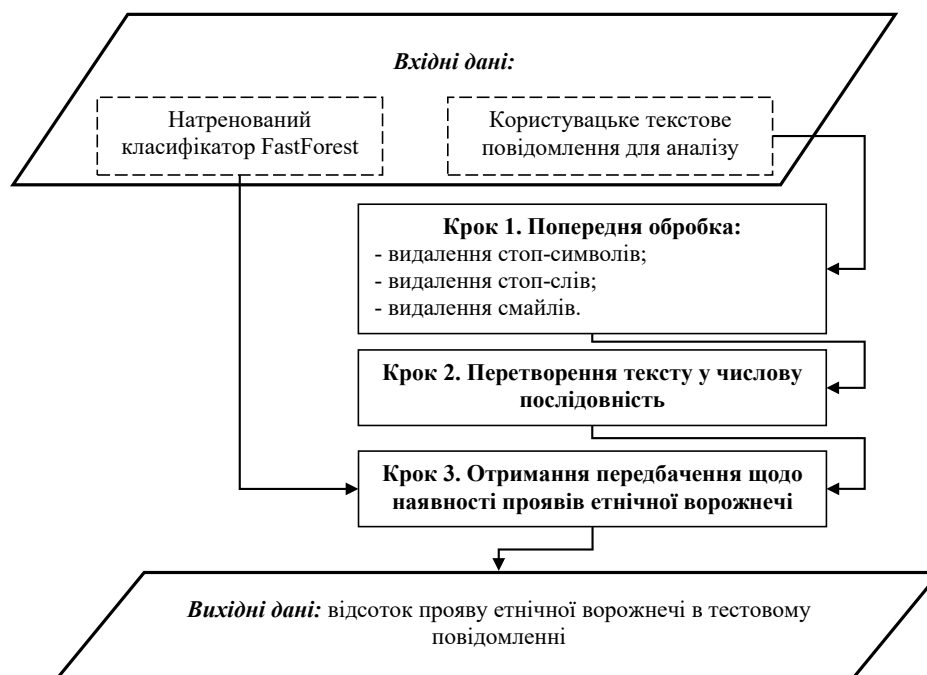


Рис. 1. Схематичне подання алгоритму неймережевого виявлення етнічної ворожнечі у цифровому текстовому контенті

Вхідними даними алгоритму неймережевого виявлення етнічної ворожнечі в цифровому текстовому контенті є натренований класифікатор FastForest та цифровий текстовий контент для аналізу. Процес роботи алгоритму складається з двох основних етапів: попередня обробка вхідного тексту (Крок 1) та передбачення за допомогою класифікатора FastForest (Крок 2 та Крок 3).

На першому етапі здійснюється попередня обробка тексту, яка включає видалення стоп-символів, стоп-слів та смайлів [12].

На другому етапі текст перетворюється у числову послідовність, яка є вхідними даними для натренованої моделі машинного навчання FastForest. Далі алгоритм отримує передбачення щодо ймовірності наявності етнічної ворожнечі на основі обробленої числової послідовності, що була подана до моделі. Вихідними даними алгоритму є відсоткова оцінка прояву етнічної ворожнечі в тестовому повідомленні.

Отже, описаний алгоритм забезпечує автоматизований аналіз цифрового текстового контенту з метою виявлення етнічної ворожнечі у текстах, що публікуються в інтернет-просторі, значно спрощуючи процес експертизи таких проявів.

Конвеєр обробки та класифікації текстових даних для виявлення етнічної ворожнечі

Конвеєр обробки текстових даних для виявлення етнічної ворожнечі забезпечує послідовне перетворення текстових повідомлень у формат, придатний для аналізу та класифікації (рис. 2). Спочатку текстові дані конвертуються у числові ознаки, які використовуються для подальшого навчання моделі. Потім відбувається об'єднання отриманих ознак у вектор характеристик, що дозволяє ефективно представляти вхідні дані.

Для коректної роботи алгоритму цільова змінна, що містить мітки класів, перетворюється у числові ключі. Після цього застосовується метод класифікації OneVersusAll, що використовує алгоритм FastForest для навчання моделі на кожному класі окремо. У даному підході використовується ансамбль з чотирьох дерев рішень, що підвищує точність класифікації, мінімізуючи ризик перенавчання, а обмеження максимальної кількості листків у кожному дереві забезпечує прозорість моделі.

Після навчання прогнозовані числові значення повертаються у вихідні мітки. Таким чином, отримана модель здатна аналізувати цифровий текстовий контент, яких не було в навчальному наборі, і здійснювати їх автоматичну класифікацію щодо наявності ознак етнічної ворожнечі.

Проектна архітектура програмного забезпечення для виявлення етнічної ворожнечі та взаємозв'язок компонентів

Архітектура програмного забезпечення для реалізації алгоритму неймережевого виявлення етнічної ворожнечі в цифровому текстовому контенті складається з трьох основних підсистем: «Підсистема обробки експериментальних даних», «Підсистема виявлення етнічної ворожнечі», «Підсистема попередньої обробки даних»; двох допоміжних підсистем: «Підсистема формування навчальної вибірки з датасету» та «Підсистема навчання моделі машинного навчання», а також загального датасету та робочого набору даних (рис. 3).

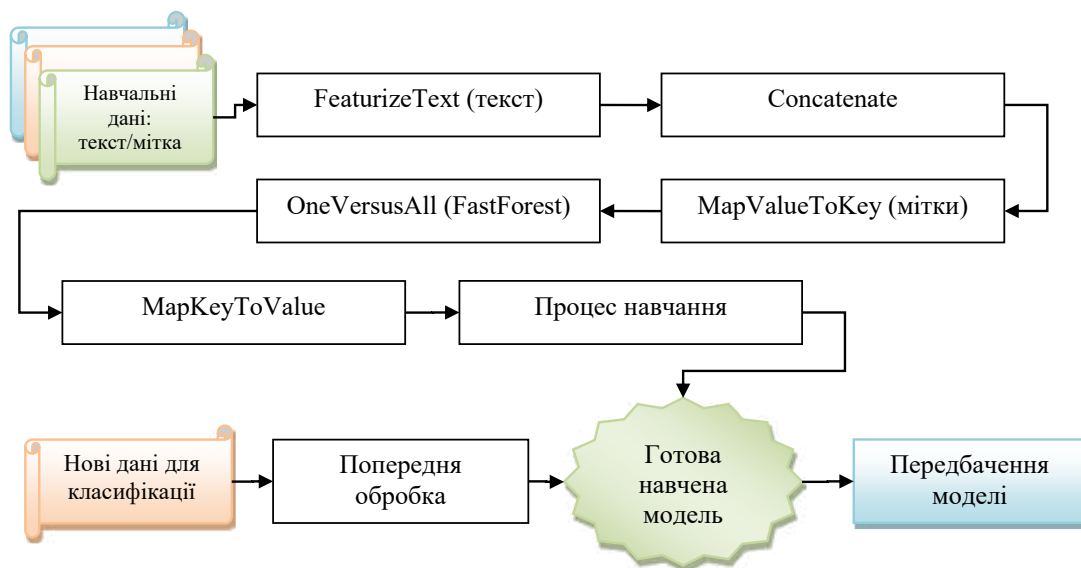


Рис. 2. Конверсер обробки та класифікації текстових даних для виявлення етнічної ворожнечі



Рис. 3. Проектна архітектура програмного забезпечення для виявлення етнічної ворожнечі

Для забезпечення функціональних можливостей інформаційної системи, яка призначена для виявлення етнічної ворожнечі, була розроблена відповідна діаграма класів [13] (рис. 4).

Підсистема навчання моделі машинного навчання реалізована через клас «BoyarchukModel1», який містить методи для побудови пайплайну, навчання нейромережі та збереження результату. Кінцевим продуктом цієї підсистеми є навчена модель машинного навчання FastForest.

Клас «FormattedDataSet» реалізує функціональність допоміжної підсистеми формування навчальної вибірки з датасету та надає методи для виведення статистики по категоріях в датасеті. Продукт цієї підсистеми – це сформований робочий набір даних, який використовується як вхід для інших підсистем.

Підсистема роботи з експериментальними даними реалізована через класи «Work_with_DataSet» та «DataSetOperation»

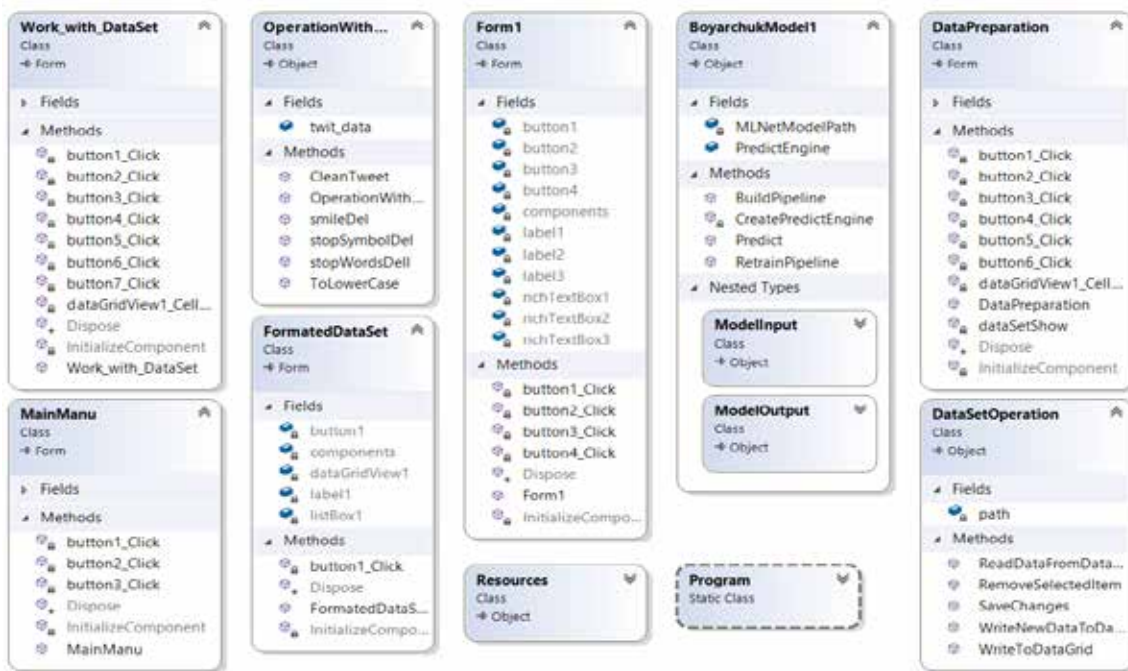


Рис. 4. Діаграма класів програмного забезпечення для виявлення етнічної ворожнечі

Таким чином, була представлена архітектура програмного забезпечення для реалізації алгоритму неймережевого виявлення етнічної ворожнечі в цифровому текстовому контенті, яка складається з трьох основних підсистем: «Підсистема обробки експериментальних даних», «Підсистема виявлення етнічної ворожнечі», «Підсистема попередньої обробки даних»; двох допоміжних підсистем: «Підсистема формування навчальної вибірки з датасету» та «Підсистема навчання моделі машинного навчання», а також загального датасету та робочого набору даних, який є результатом роботи підсистеми формування навчальної вибірки з датасету.

Дослідження ефективності алгоритму неймережевого виявлення етнічної ворожнечі у цифровому текстовому контенті спроектованим розробленим програмним забезпеченням

Для всіх експериментів було розроблено програмне забезпечення у вигляді віконного застосунку, для розробки якого було використано платформу.NET 7.0, середовище програмування Visual Studio, та мову програмування C# [14]. Приклад роботи алгоритму неймережевого виявлення етнічної ворожнечі у цифровому текстовому контенті спроектованим розробленим програмним забезпеченням наведено на рис. 5.

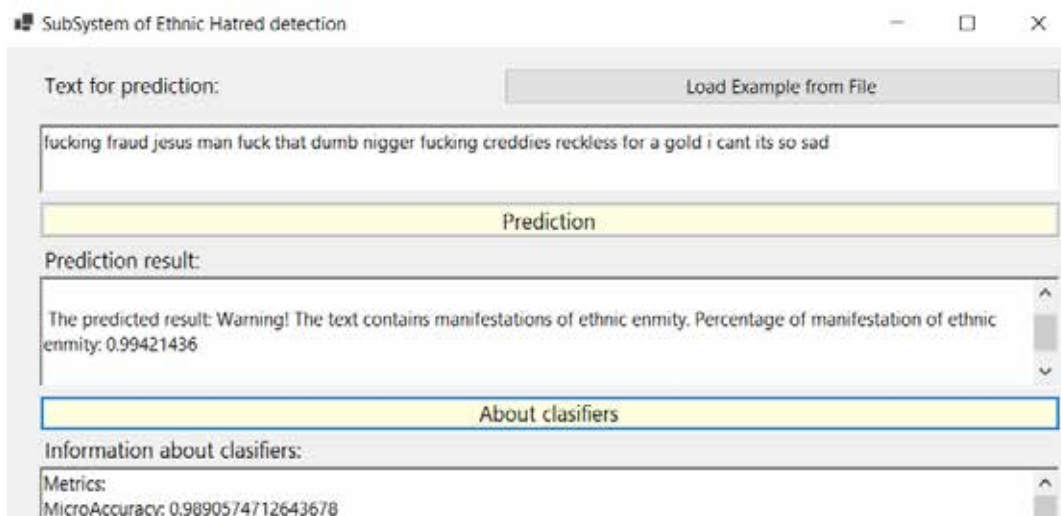


Рис. 5. Приклад виявлення етнічної ворожнечі у цифровому текстовому контенті спроектованим розробленим програмним забезпеченням

Оцінка ефективності алгоритму нейромережевого виявлення етнічної ворожнечі у цифровому текстовому контенті здійснювалась шляхом порівняння результатів роботи алгоритму з валідаційним набором даних, а також виконанням детальної оцінки навченої моделі машинного навчання FastForest. Для цього використовувалися такі метрики, як MicroAccuracy, MacroAccuracy, LogLoss, ConfusionMatrix, f1-міра та Recall, які дозволяють всебічно оцінити ефективність алгоритму з точки зору точності та здатності до виявлення етнічної ворожнечі в цифровому текстовому контенті [15].

За результатами оцінки алгоритму, виконаної за базовим навчальним набором даних, було отримано значення метрик, що свідчать про високий рівень точності та надійності роботи алгоритму. Зокрема, значення MicroAccuracy складо 0.9890, що вказує на високу загальну точність моделі, а MacroAccuracy досягло 0.9889, що свідчить про хорошу здатність алгоритму працювати з усіма категоріями даних. Логарифмічний збиток (LogLoss) становить 0.0463, що також підтверджує ефективність алгоритму в мінімізації помилок під час класифікації.

Зокрема, матриця сплутувань демонструє, що алгоритм правильно класифікує більшість випадків, не містять ознак етнічної ворожнечі, з кількістю 5 902 правильно передбачених випадків, що складає високий рівень точності для цього класу. Для випадків, що містять ознаки етнічної ворожнечі, модель успішно передбачила 4 854 випадки, з кількістю помилок у 64 випадки. Це дозволяє стверджувати, що алгоритм ефективно справляється з завданням виявлення ознак етнічної ворожнечі в цифрових текстових повідомленнях. Метрика Precision для класу «Не містить ознак етнічної ворожнечі» складає 0.9893, а для класу «Містить ознаки етнічної ворожнечі» – 0.9888. Ця метрика відображає точність класифікації позитивних випадків серед усіх випадків, які модель класифікує як позитивні. Високе значення Precision свідчить про те, що модель здатна правильно відокремлювати класи та мінімізувати кількість помилок при класифікації випадків, що належать до певного класу.

Метрика Recall для класу «Не містить ознак етнічної ворожнечі» дорівнює 0.9908, а для класу «Містить ознаки етнічної ворожнечі» – 0.9870. Recall вимірює, наскільки ефективно модель виявляє всі істинно позитивні випадки в даному наборі даних. Високе значення Recall означає, що модель здатна виявити більшість випадків етнічної ворожнечі в текстах, не пропускаючи їх. Порівняння отриманих метрик наведено на рис. 6.

Загалом, ці метрики вказують на високу точність та здатність моделі до ефективного виявлення як випадків з ознаками етнічної ворожнечі, так і випадків без таких ознак.

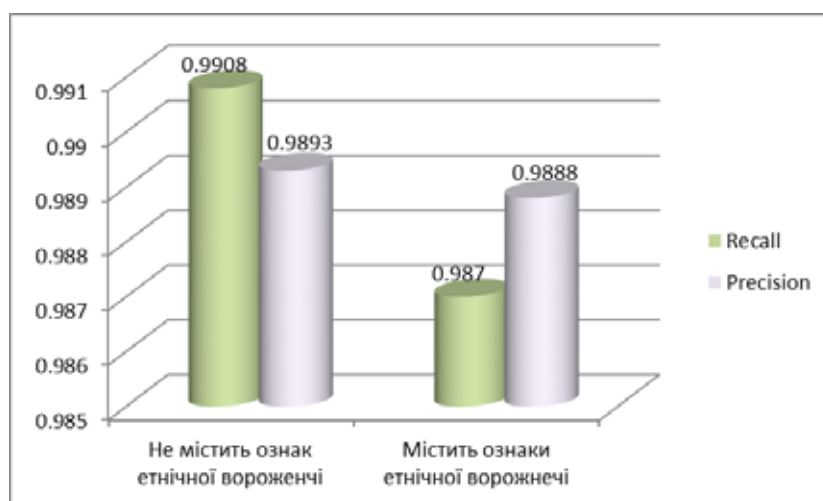


Рис. 6. Оцінка навчених нейромережевих моделей за метриками

Напрями потенційного застосування алгоритму виявлення етнічної ворожнечі та відповідної програмної системи можуть включати платформи соціальних мереж та вебсайти, де такі системи можуть бути використані для автоматичного виявлення та фільтрації образливих, расистських або ненависницьких висловлювань. Це сприятиме створенню більш безпечних онлайн-середовищ, де користувачі зможуть взаємодіяти без загрози для психічного благополуччя. Крім того, отримані результати можуть бути використані дослідниками, соціальними активістами та організаціями, які займаються аналізом та вивченням ознак етнічної ворожнечі. Це дозволить краще зрозуміти мотиви та наслідки таких висловлювань і сприятиме розробці більш ефективних стратегій протидії цим явищам.

Висновки

У статті розглянуто поточний стан нейромережевого виявлення етнічної ворожнечі у цифровому текстовому контенті. Зазначено, що традиційні підходи до аналізу та модерації не здатні справитися з величезними обсягами даних, що постійно зростають. Використання технологій глибинного навчання, обробки природної мови та

штучного інтелекту дозволяє автоматично виявляти ознаки етнічної ворожнечі у текстах, враховуючи контекст та приховані патерни дискримінаційних висловлювань. Такий підхід може значно підвищити ефективність виявлення шкідливого контенту і зменшити соціальну напругу в цифровому просторі. Для забезпечення ефективної реалізації цих алгоритмів необхідно створити відповідне програмне забезпечення, яке забезпечить масштабованість та інтеграцію в реальні системи модерації контенту.

В рамках роботи запропоновано алгоритм нейромережевого виявлення етнічної ворожнечі в цифровому текстовому контенті, який автоматизує процес аналізу текстів, що публікуються в інтернет-просторі, для виявлення проявів етнічної ворожнечі або конфліктних висловлювань між етнічними групами. Він складається з двох основних етапів: попередньої обробки тексту, що включає видалення стоп-символів та смайлів, та передбачення за допомогою натренованої моделі FastForest, яка перетворює текст в числову послідовність для подальшого аналізу. Результатом роботи алгоритму є відсоткова оцінка ймовірності наявності етнічної ворожнечі в аналізованому тексті, що дозволяє автоматизувати виявлення таких проявів у цифровому контенті та спрощує процес їх експертизи.

Запропоновано конвеєр обробки та класифікації текстових даних для виявлення етнічної ворожнечі, який включає послідовне перетворення текстових повідомлень у числові ознаки, які потім об'єднуються в вектор характеристик для подальшого аналізу та класифікації. Спочатку цільова змінна перетворюється в числові ключі, після чого застосовується метод OneVersusAll з алгоритмом FastForest для навчання моделі на кожному класі окремо за допомогою ансамблю з чотирьох дерев рішень, що підвищує точність і знижує ризик перенавчання. Після навчання модель може автоматично класифікувати новий цифровий текстовий контент на наявність або відсутність ознак етнічної ворожнечі, використовуючи прогнозовані числові значення, які повертаються до вихідних міток.

Спроектовано архітектуру програмного забезпечення для реалізації алгоритму нейромережевого виявлення етнічної ворожнечі, що складається з трьох основних підсистем: «Підсистема обробки експериментальних даних», «Підсистема виявлення етнічної ворожнечі» та «Підсистема попередньої обробки даних», а також двох допоміжних підсистем: «Підсистема формування навчальної вибірки з датасету» та «Підсистема навчання моделі машинного навчання». Підсистема формування навчальної вибірки створює робочий набір даних для подальшого навчання класифікатора, тоді як підсистема навчання моделі відповідає за налаштування, навчання і збереження натренованої моделі. В результаті цього процесу утворюється модель FastForest, яка здатна виявляти ознаки етнічної ворожнечі у текстах. Спроектвані підсистеми реалізовано у вигляді застосунку, у якому всі розроблені компоненти працюють у тандемі для досягнення цілей автоматизованого виявлення етнічної ворожнечі в цифровому контенті.

Також було виконано оцінку ефективності розробленого алгоритму нейромережевого виявлення етнічної ворожнечі спроектованим та розробленим програмним забезпеченням, що проводилась шляхом порівняння результатів роботи алгоритму з валідаційним набором даних за допомогою метрик, таких як MicroAccuracy, MacroAccuracy, LogLoss, ConfusionMatrix, f1-міра та Recall. За результатами оцінки алгоритм продемонстрував високий рівень точності та надійності, з MicroAccuracy 0.9890, MacroAccuracy 0.9889, LogLoss 0.0463, а також з високими значеннями Precision та Recall для класів з та без ознак етнічної ворожнечі. Зокрема, модель успішно класифікувала більшість випадків, правильно передбачивши 4 854 з 4 918 випадків з етнічною ворожнечею, що підтверджує її ефективність. Потенційні сфери застосування алгоритму включають платформи соціальних мереж та вебсайти для автоматичного виявлення образливих або расистських висловлювань, а також його використання дослідниками та соціальними активістами для глибшого аналізу етнічної ворожнечі.

Список використаної літератури

1. Raza Ur Rehman H. M. Detecting hate in diversity: a survey of multilingual code-mixed image and video analysis / H. M. Raza Ur Rehman, M. Saleem, M. Z. Jhandir, E. S. Alvarado, H. Garay, I. Ashraf // Journal of Big Data. 2025. Vol. 12, No. 1. P. 109. <https://doi.org/10.1186/s40537-025-01167-w>.
2. Okpala E. Large Language Model Annotation Bias in Hate Speech Detection / E. Okpala, L. Cheng // Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media. 2025. Vol. 19. P. 1389–1418. <https://doi.org/10.1609/icwsm.v19i1.35879>.
3. Akram M. H. ISE-Hate: A benchmark corpus for inter-faith, sectarian, and ethnic hatred detection on social media in Urdu / M. H. Akram, K. Shahzad, M. Bashir // Information Processing & Management. 2023. Vol. 60, No. 3. P. 103270. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2023.103270>.
4. Guan T. Countering Ethnic Minority-Targeted Hate Speech in a Multicultural Society / T. Guan, Y. Yang, T. Liu // Race and Social Problems. 2025. Vol. 17, No. 3. P. 233–248. <https://doi.org/10.1007/s12552-024-09426-w>
5. Овчарук О.М. Нейромережеве діагностування проявів ПТСР у текстовому контенті з використанням помилко-орієнтованого навчального набору даних / О.М. Овчарук, О.В. Мазурець // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2024. № 6, Т. 1 (343). С. 195–200. <http://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-30>.

6. Залуцька О.О. Метод інтелектуального аналізу емоційної тональності текстової інформації для визначення поведінкових намірів нейромережевими засобами / О.О. Залуцька, М.О. Молчанова, О.В. Мазурець, О.І. Мельник, Т.К. Скрипник // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2023. № 5 (325), Т. 1. С. 67–73. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-325-5>.
7. Молчанова М.О. Підхід до тестування об'єктно-орієнтованих систем керування в електронній комерції / М.О. Молчанова, О.В. Мазурець, П.О. Шевчук, В.І. Кліменко, О.О. Тищенко // Наука і техніка сьогодні. 2025. № 4 (45). С. 1273–1285. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4\(45\)-1273-1285](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4(45)-1273-1285).
8. Yin W. Towards generalisable hate speech detection: a review on obstacles and solutions / W. Yin, A. Zubiaga // PeerJ Computer Science. 2021. Vol. 7. P. e598. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.598>
9. Alsafari S. Hate and offensive speech detection on Arabic social media / S. Alsafari, S. Sadaoui, M. Mouhoub // Online Social Networks and Media. 2020. Vol. 19. P. 100096. <https://doi.org/10.1016/j.osnem.2020.100096>.
10. Firmino A. A. Improving hate speech detection using cross-lingual learning / A. A. Firmino, C. de Souza Baptista, A. C. de Paiva // Expert Systems with Applications. 2024. Vol. 235. P. 121115. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121115>.
11. Мазурець О.В. Метод виявлення депресивного стану пов'язаного із навчанням у закладах освіти із використанням нейромережі дуальної архітектури / О.В. Мазурець, І.А. Тимофієв, В.І. Кліменко, О.О. Тищенко // Вісник Херсонського національного технічного університету. 2024. № 4 (91). С. 311–318. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.41>.
12. Віт Р.В. Підхід до тематичної класифікації текстової інформації засобами обробки природної мови / Р.В. Віт, О.В. Мазурець // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Проблеми моделювання та автоматизації проєктування. 2025. № 1 (21). С. 94–99. <https://doi.org/10.31474/2074-7888>.
13. Собко О.В. Особливості програмної інженерії та тестування програмного забезпечення для нейромережевого аналізу фотоданих залишків зруйнованих будівель із роботизованої техніки / О.В. Собко, В.І. Кліменко, О.В. Мазурець, О.О. Залуцька, О.В. Гладун // Наука і техніка сьогодні. 2025. № 4 (45). С. 1566–1581. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4\(45\)-1566-1581](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4(45)-1566-1581).
14. Молчанова М.О. Алгоритм виявлення аб'юзивного вмісту в україномовному аудіоконтенті для імплементації в об'єктно-орієнтовану інформаційну систему / М.О. Молчанова, О.В. Мазурець, О.В. Собко, Р.В. Віт, В.В. Назаров // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2024. № 1 (331). С. 101–106. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-17>.
15. Sathyanarayanan S. Confusion matrix-based performance evaluation metrics / S. Sathyanarayanan, B. R. Tantri // African Journal of Biomedical Research. 2024. Vol. 27, No. 4S. P. 4023–4031. <https://doi.org/10.53555/AJBR.v27i4S.4345>.

References

1. Raza Ur Rehman, H. M., Saleem, M., Jhandir, M. Z., Alvarado, E. S., Garay, H., & Ashraf, I. (2025). Detecting hate in diversity: a survey of multilingual code-mixed image and video analysis. *Journal of Big Data*, 12(1), 109. <https://doi.org/10.1186/s40537-025-01167-w>.
2. Okpala, E., & Cheng, L. (2025). Large Language Model Annotation Bias in Hate Speech Detection. In *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media* (Vol. 19, pp. 1389-1418). <https://doi.org/10.1609/icwsm.v19i1.35879>.
3. Akram, M. H., Shahzad, K., & Bashir, M. (2023). ISE-Hate: A benchmark corpus for inter-faith, sectarian, and ethnic hatred detection on social media in Urdu. *Information Processing & Management*, 60(3), 103270. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2023.103270>.
4. Guan, T., Yang, Y., & Liu, T. (2025). Countering Ethnic Minority-Targeted Hate Speech in a Multicultural Society. *Race and Social Problems*, 17(3), 233-248. <https://doi.org/10.1007/s12552-024-09426-w>.
5. Ovcharuk O.M., Mazurets O.V. (2024) Neiromerzheve diahnostuvannia proiaviv PTSD u tekstovomu kontenti z vykorystanniam pomylko-orientovanoho navchalnoho naboru danykh [Neural network diagnostics of PTSD manifestations in textual content using an error-oriented dataset]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky*, № 6, T.1 (343), pp. 195–200. <http://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-30>.
6. Zalutska O.O., Molchanova M.O., Mazurets O.V., Melnyk O.I., Skrypnyk T.K. (2023) Metod intelektualnoho analizu emotsiinoi tonalnosti tekstovoi informatsii dlia vyznachennia povedinkovykh namiriv neiomerezhsevyymi zasobamy [Method of intelligent analysis of emotional tone in textual information for determining behavioral intentions using neural network tools]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky*, № 5 (325), T.1, pp. 67–73. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-325-5>.
7. Molchanova M.O., Mazurets O.V., Shevchuk P.O., Klimentko V.I., Tyshchenko O.O. (2025) Pidhid do testuvannia obiektno-orientovanykh system keruvannia v elektronni komertsi [Approach to testing object-oriented control systems

in e-commerce]. *Nauka i tekhnika siohodni*, № 4 (45), pp. 1273–1285. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4\(45\)-1273-1285](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4(45)-1273-1285).

8. Yin, W., & Zubiaga, A. (2021). Towards generalisable hate speech detection: a review on obstacles and solutions. *PeerJ computer science*, 7, e598. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.598>.

9. Alsafari, S., Sadaoui, S., & Mouhoub, M. (2020). Hate and offensive speech detection on Arabic social media. *Online Social Networks and Media*, 19, 100096. <https://doi.org/10.1016/j.osnem.2020.100096>.

10. Firmino, A. A., de Souza Baptista, C., & de Paiva, A. C. (2024). Improving hate speech detection using cross-lingual learning. *Expert Systems with Applications*, 235, 121115. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121115>.

11. Mazurets O.V., Tymofiev I.A., Klimentko V.I., Tyshchenko O.O. (2024) Metod vyivlennia depresyvnogo stanu poviazanoho iz navchanniam u zakladakh osvity iz vykorystanniam neiromerezhi dualnoi arkhitektury [Method for detecting depression related to studying in educational institutions using a dual-architecture neural network]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, № 4 (91), pp. 311–318. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.41>.

12. Vit R.V., Mazurets O.V. (2025) Pidhid do tematychnoi klasyfikatsii tekstovoi informatsii zasobamy obrobky pryrodnoi movy [Approach to thematic classification of textual information using natural language processing]. *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: Problemy modeliuвання ta avtomatyzatsii proektuvannia*, № 1 (21), pp. 94–99. <https://doi.org/10.31474/2074-7888>.

13. Sobko O.V., Klimentko V.I., Mazurets O.V., Zalutska O.O., Hladun O.V. (2025) Osoblyvosti prohramnoi inzhenerii ta testuvannia prohramnoho zabezpechennia dlia neiromerezhsevoho analizu fotodanykh zalyshkiv zruynovanykh budivel iz robotyzovanoi tekhniki [Features of software engineering and testing for neural network analysis of photographic data of destroyed buildings using robotic technology]. *Nauka i tekhnika siohodni*, № 4 (45), pp. 1566–1581. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4\(45\)-1566-1581](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4(45)-1566-1581).

14. Molchanova M.O., Mazurets O.V., Sobko O.V., Vit R.V., Nazarov V.V. (2024) Alhorytm vyivlennia ab'iuzyvnoho vmistu v ukrayinomovnomu audiokontenti dlia implementatsii v ob'ektno-orientovanu informatsiinu systemu [Algorithm for detecting abusive content in Ukrainian audio content for implementation in an object-oriented information system]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky*, № 1 (331), pp. 101–106. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-17>.

15. Sathyanarayanan, S., & Tantri, B. R. (2024). Confusion matrix-based performance evaluation metrics. *African Journal of Biomedical Research*, 27(4S), 4023-4031. <https://doi.org/10.53555/AJBR.v27i4S.4345>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 15.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

О. М. КОЗАЧКО

кандидат технічних наук,
доцент кафедри системного аналізу та інформаційних технологій
Вінницький національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-3033-9745

А. В. СИГУТА

аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка»
ORCID: 0009-0009-8328-1277

А. В. ВОЙТІК

кандидат технічних наук,
доцент кафедри агроінженерії
Уманський національний університет
ORCID: 0000-0002-8196-3102

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ В ЗАВДАННЯХ РОЗПІЗНАВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Актуальність дослідження зумовлено потребою у створенні математично обґрунтованих підходів до оптимізації алгоритмів машинного навчання, які застосовуються в завданнях розпізнавання зображень. Швидке зростання обсягів візуальної інформації, складність її структури та вимоги до точності і швидкодії алгоритмів визначають необхідність пошуку універсальних методів, здатних підвищити надійність і практичну ефективність систем комп'ютерного зору. Показано, що традиційні алгоритмічні рішення не забезпечують достатньої прозорості процесів навчання і часто потребують повного перенавчання в разі зміння умов середовища, що обмежує їх прикладне використання.

Мета статті полягає в розробленні концептуально та прикладно обґрунтованих підходів до математичного моделювання процесів машинного навчання у сфері розпізнавання зображень, які забезпечують підвищення точності, стійкості та адаптивності алгоритмів до реальних умов застосування.

Методологія дослідження базується на поєднанні системного аналізу властивостей даних, формалізації закономірностей процесів навчання та використанні статистичних, оптимізаційних і геометричних методів. Використано підхід багаторівневого моделювання, який дає змогу одночасно описувати внутрішні параметричні зміни в архітектурах алгоритмів та зовнішні характеристики їх функціонування. Запропоновано застосування інструментів на кшталт Scikit-learn, TensorFlow, PyTorch, OpenCV та ResNet для забезпечення практичної реалізованості моделей.

Результати роботи полягають у дослідженні ключових факторів складності математичного моделювання, зокрема багатовимірності й стохастичності даних, нелінійності процесів навчання та обмежень апаратних ресурсів. Установлено, що застосування формалізованих моделей забезпечує контроль навчальних процесів, підвищує точність алгоритмів, збільшує стійкість до шуму й неповних даних, а також відкриває можливість прогнозування результатів і адаптації систем без потреби повного перенавчання. Доведено, що інтеграція моделей у прикладні технології медицини, транспорту, безпеки та промисловості дає змогу зменшити похибки, підвищити швидкодню та оптимізувати витрати.

Висновки підтверджують, що математичне моделювання процесів машинного навчання є ефективним інструментом для підвищення якості розпізнавання зображень. Виявлено бар'єри його застосування, серед яких висока обчислювальна складність, недостатня узагальнюваність і чутливість до якості даних. Доведено, що їх подолання можливе шляхом упровадження енергоефективних і модульних архітектур, адаптивних механізмів та методів explainable AI.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням симуляційних середовищ для перевірки моделей у реалістичних умовах, створенням галузевих анотованих датасетів, розвитком цифрових близнюків для відтворення процесів навчання та інтеграцією гібридних методів, що поєднують статистичні, геометричні та нейромережеві підходи.

Ключові слова: комп'ютерний зір, глибинні нейронні мережі, статистичне моделювання, оптимізаційні алгоритми, узагальнення результатів, адаптивні системи, стійкість до шуму.

О. М. KOZACHKO

PhD (Engineering),
Associate Professor at the Department of Systems Analysis
and Information Technologies
Vinnytsia National Technical University
ORCID: 0000-0003-3033-9745

A. V. SYGUTA

Postgraduate Student at the Department of Information
and Computer Systems
Chernihiv National University of Technology
ORCID: 0009-0009-8328-1277

A. V. VOITIK

PhD (Engineering),
Associate Professor at the Department of Agricultural Engineering
Uman National University
ORCID: 0000-0002-8196-3102

MATHEMATICAL MODELING OF MACHINE LEARNING PROCESSES IN IMAGE RECOGNITION TASKS

The relevance of this study is driven by the need to develop mathematically grounded approaches to optimizing machine learning algorithms applied in image recognition tasks. The rapid growth in visual information volumes, the complexity of its structure, and the requirements for algorithm accuracy and performance determine the necessity of finding universal methods capable of enhancing the reliability and practical effectiveness of computer vision systems. It is shown that traditional algorithmic solutions do not provide sufficient transparency in learning processes and often require complete retraining when environmental conditions change, which limits their applied use.

The aim of this article is to develop conceptually and practically justified approaches to mathematical modeling of machine learning processes in the field of image recognition, which ensure improved accuracy, robustness, and adaptability of algorithms to real-world application conditions.

The research methodology is based on combining systematic analysis of data properties, formalization of learning process patterns, and the use of statistical, optimization, and geometric methods. A multilevel modeling approach is employed, allowing simultaneous description of internal parametric changes in algorithm architectures and external characteristics of their functioning. The application of tools such as Scikit-learn, TensorFlow, PyTorch, OpenCV, and ResNet is proposed to ensure practical model implementation.

The results of this work consist of investigating key complexity factors in mathematical modeling, including data multidimensionality and stochasticity, learning process nonlinearity, and hardware resource constraints. It is established that the application of formalized models ensures control over learning processes, increases algorithm accuracy, enhances robustness to noise and incomplete data, and opens opportunities for predicting results and adapting systems without the need for complete retraining. It is proven that integrating models into applied technologies in medicine, transportation, security, and industry enables error reduction, performance enhancement, and cost optimization.

The conclusions confirm that mathematical modeling of machine learning processes is an effective tool for improving image recognition quality. Barriers to its application are identified, including high computational complexity, insufficient generalizability, and sensitivity to data quality. It is proven that overcoming these barriers is possible through implementing energy-efficient and modular architectures, adaptive mechanisms, and explainable AI methods.

Prospects for further research are associated with improving simulation environments for model validation under realistic conditions, creating industry-specific annotated datasets, developing digital twins to reproduce learning processes, and integrating hybrid methods that combine statistical, geometric, and neural network approaches.

Key words: *computer vision, deep neural networks, statistical modeling, optimization algorithms, result generalization, adaptive systems, noise robustness.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах стрімкого зростання обсягів візуальної інформації та ускладнення завдань її автоматизованої обробки особливої актуальності набуває створення формалізованих підходів до опису та оптимізації алгоритмів машинного навчання. Проблема полягає в пошуку таких математичних моделей, які б давали змогу відтворювати динаміку процесів розпізнавання зображень, враховуючи багатовимірність даних, стохастичний характер їхніх змін і необхідність забезпечення стабільності результатів. Її наукову значущість визначає можливість розроблення універсальних схем аналізу та прогнозування ефективності алгоритмів, тоді як практична цінність проявляється у здатності забезпечити точність і швидкодію систем комп'ютерного зору, що застосовуються в медицині, транспортній інфраструктурі, безпекових технологіях і промисловій автоматизації. Таким чином, постає завдання

побудови узгоджених математичних моделей, які не лише пояснюють роботу алгоритмів, а й створюють умови для їх подальшого вдосконалення та адаптації до реальних середовищ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наукові праці, присвячені математичному моделюванню процесів машинного навчання в завданнях розпізнавання зображень, логічно групуються за чотирима напрямками. Перший напрям охоплює узагальнені методологічні підходи й концептуальні основи формалізації алгоритмів. М. Сахні (M. Sahni) та співавтори в колективній монографії систематизують сучасні математичні методи аналізу нейронних мереж, доводячи, що формалізовані моделі є базовим інструментом для опису процесів навчання й узагальнення результатів у завданнях розпізнавання образів [1]. Дж. Матушевські (J. Matuszewski) та співавтори демонструють прикладне використання алгоритмів машинного навчання у візуальних задачах, зосереджуючи увагу на ролі математичного моделювання в оптимізації швидкодії та надійності [2]. П. Рані (P. Rani) та співавтори розглядають виклики, що виникають під час автоматичного розпізнавання мікроорганізмів, де формалізація моделей дає змогу інтегрувати класичні й глибинні алгоритми, хоча залишається проблема інтерпретації [3]. І. Лі (Y. Li) доводить, що глибинне навчання через адаптивні математичні моделі значно підвищує точність класифікації, створюючи підґрунтя для широкого застосування в комп'ютерному баченні [4]. Доцільно поглибити дослідження у створенні єдиних методологічних рамок, що узгоджують класичні алгоритми та глибинні архітектури у формалізованих математичних схемах.

Другий напрям охоплює медико-біологічні та інженерні застосування, де моделювання використовується для обробки складних предметних зображень. Б. Хе (B. He) та співавтори запропонували новий метод для розпізнавання СТС-зображень, у якому математичне моделювання морфологічних ознак підвищує точність діагностики [5]. П. Ван (P. Wang) і співавтори виконали порівняльний аналіз алгоритмів традиційного машинного навчання та глибинних моделей, показавши, що саме формальні математичні схеми дають змогу виявити реальні переваги й недоліки кожного підходу [6]. С. Карпентер (C. Carpenter) і співавтори демонструють, як використання математично обґрунтованих моделей у машинному навчанні підвищує точність класифікації геологічних порід, що важливо для галузевих рішень [7]. Л. Лі (L. Li) та співавтори в прикладному дослідженні доводять, що глибинне навчання формує формалізовані моделі нелінійних зв'язків, завдяки яким стає можливим ефективне розпізнавання об'єктів у різних сферах [8]. Доцільно розширити адаптивні математичні моделі, здатні поєднувати точність формального опису з можливістю врахування варіативності даних у біології та інженерії.

Третій напрям зосереджується на спеціалізованих архітектурах і нових методах моделювання. Г. Лоу (G. Lou) та співавтори показують, що згорткові нейронні мережі як математично формалізовані структури роблять можливим багаторівневе виділення ознак і підвищення стійкості класифікації [9]. А. Хан (A. Khan) і співавтори у своєму огляді підтверджують, що математичне моделювання є ключовим чинником масштабованості алгоритмів комп'ютерного зору [10]. О. Енафф (O. Henaff) і співавтори в праці з data-efficient learning запропонували contrastive predictive coding, який через формалізацію інформаційних процесів оптимізує відбір ознак у режимі обмежених даних [11]. М. Ебрагімі (M. Ebrahimi) та співавтори проаналізували залишкові мережі, довівши, що математичні моделі таких архітектур дають змогу уникати проблеми деградації точності в глибоких мережах [12]. Перспективним є розроблення гібридних архітектур, які інтегрують класичні математичні формалізації з новітніми мережевими підходами для подолання обчислювальних бар'єрів і втрат інформації.

Четвертий напрям охоплює інноваційні та предметно орієнтовані моделі. М. Хендерсон (M. Henderson) і співавтори пропонують використання квантових схем для побудови моделей розпізнавання зображень, доводячи, що математичне моделювання квантових процесів відкриває нові горизонти для обробки даних [13]. Ф. Цзян (F. Jiang) і співавтори інтегрували глибинне навчання та метод опорних векторів для розпізнавання хвороб рисового листя, що є прикладом мультиалгоритмічної математичної моделі [14]. Ч. Сінгх (C. Singh) і співавтори у своїй роботі підсумували підходи машинного навчання в розпізнаванні патернів, наголосивши, що математичне моделювання становить концептуальну основу таких систем [15]. Подальший розвиток варто спрямувати на поєднання класичних математичних апаратів з інноваційними квантовими та мультиалгоритмічними моделями, що забезпечує гнучкість і адаптивність у предметних застосуваннях.

Попри значні досягнення в розвитку алгоритмів машинного навчання для завдань розпізнавання зображень, низка аспектів залишається невирішеною. Недостатньо досліджено можливості формалізованого математичного опису процесів навчання, що обмежує прозорість і керованість алгоритмів. Складність моделювання зумовлена багатовимірністю та стохастичністю даних, нелінійністю внутрішніх процесів і високими вимогами до обчислювальних ресурсів. Також невирішеними залишаються проблеми узагальюваності результатів за різними класами зображень, чутливості до шуму та обмеженої адаптивності моделей у реальних умовах застосування.

Запропоноване дослідження спрямоване на подолання цих прогалин шляхом розроблення нових методологічних підходів і математичних моделей, які здатні формалізувати ключові закономірності навчання та забезпечити їх узагальнення. Передбачено використання статистичних, оптимізаційних і гібридних методів, а також інструментів сучасних бібліотек машинного навчання для підвищення точності, стійкості й адаптивності алгоритмів.

Такий підхід дасть змогу зменшити залежність від великих обсягів даних, подолати обчислювальні бар'єри та забезпечити ефективну інтеграцію математичного моделювання в прикладні технології комп'ютерного зору.

Формулювання мети дослідження

Мета статті полягає в розробленні науково обґрунтованих підходів до математичного моделювання процесів машинного навчання в завданнях розпізнавання зображень з урахуванням потреби у високій точності, стійкості та практичній застосовності результатів.

Для реалізації поставленої мети визначено такі завдання:

- 1) обґрунтувати роль математичного моделювання в підвищенні ефективності алгоритмів машинного навчання та визначити ключові фактори їхньої складності;
- 2) розкрити методологічні засади побудови моделей і окреслити бар'єри їх практичного застосування в системах комп'ютерного зору;
- 3) сформулювати рекомендації щодо вдосконалення підходів та інтеграції математичного моделювання в прикладні технології розпізнавання зображень.

Викладення основного матеріалу дослідження

Необхідність використання математичного моделювання у сфері машинного навчання для завдань розпізнавання зображень зумовлена тим, що традиційні алгоритмічні підходи здебільшого не забезпечують повної прозорості та керованості процесів навчання. Вони орієнтовані на емпіричні результати, але не завжди дають змогу оцінити внутрішні закономірності функціонування моделей, що ускладнює їхнє вдосконалення та адаптацію до нових умов. Саме математичне моделювання надає інструменти для формалізації залежностей між вхідними даними, архітектурою алгоритму та його вихідними результатами, створюючи основу для оптимізації точності, швидкодії та стійкості до шуму. Крім того, воно сприяє розробленню методів прогнозування ефективності моделей у різних прикладних контекстах, що є ключовим для практичного використання систем комп'ютерного зору в медицині, транспорті чи безпеці (табл. 1).

Таблиця 1

Переваги використання математичного моделювання в алгоритмах машинного навчання для розпізнавання зображень

Аспект застосування	Без моделювання	З використанням математичного моделювання
Контроль процесів навчання	Обмежене спостереження за результатами	Формалізоване відображення ключових закономірностей
Точність алгоритмів	Залежить від емпіричного добору параметрів	Підвищується завдяки оптимізації параметрів і структур
Стійкість до шуму та неповних даних	Низька або непередбачувана	Забезпечується через математичні методи згладжування та корекції
Можливість прогнозування результатів	Обмежена	Реалізується через аналітичні та симуляційні моделі
Адаптивність до нових умов	Часто вимагає перенавчання	Досягається завдяки узагальненим моделям і сценарному аналізу

Джерело: сформовано авторами на підставі [1, р. 45–47; 2, р. 414–415; 3, р. 1805–1806; 6, р. 62; 11; 12, р. 678–679]

Так, контроль процесів навчання в медичних діагностичних системах дає можливість на етапі моделювання виявляти перенавчання нейронних мереж, яке в практиці без моделювання часто залишається прихованим і знижує надійність діагнозу. Використання формалізованих моделей дає змогу створювати симуляційні набори даних, що відтворюють рідкісні патології (наприклад, пухлини на ранніх стадіях), які зазвичай представлені в дуже малих вибірках. Це дає можливість лікарям отримувати інструменти, здатні точно працювати навіть за дефіциту даних.

Підвищення точності алгоритмів через математичне моделювання має практичний ефект у промисловості. Наприклад, у виробництві мікрочипів автоматизовані системи візуального контролю мають ідентифікувати дефекти розміром у нанометри. Без моделювання параметри алгоритмів часто добираються емпірично, що призводить до високих втрат через браковану продукцію. Математичні моделі, навпаки, дають змогу оптимізувати параметри так, щоб система відсіювала лише справді дефектні зразки, зменшуючи економічні витрати.

Стійкість до шуму й неповних даних стає критичною в транспортній галузі. Автомобільні системи допомоги водієві (ADAS) мають розпізнавати пішоходів і транспортні знаки навіть під час дощу чи снігопаду [1, р. 59–60]. На практиці це реалізується завдяки математичному моделюванню «зашумлених» сценаріїв, коли алгоритм навчається працювати з частково розмитими або частково закритими об'єктами. Таким чином, навіть у випадках низької видимості система зберігає високу точність розпізнавання.

Можливість прогнозування результатів через симуляційні моделі активно використовується у сфері міського відеоспостереження. Наприклад, під час упровадження алгоритмів для аналізу поведінки натовпу в метро чи

на стадіонах моделювання дає змогу оцінити ефективність розпізнавання за різних рівнів освітлення, кількості камер або кутів огляду. Це допомагає уникнути критичних збоїв під час масових заходів, коли помилка алгоритму може мати значні соціальні наслідки.

Адаптивність до нових умов особливо важлива у сфері кібербезпеки, де алгоритми використовуються для верифікації візуальних підписів, QR-кодів чи документів. Без моделювання такі алгоритми потребували б регулярного повного перенавчання. Завдяки математичним моделям створюються «універсальні ядра», які дають змогу алгоритму швидко пристосуватися до нових форматів чи специфікацій без повторного навчання на всьому масиві даних. У практиці банківських систем це суттєво скорочує витрати та підвищує рівень безпеки.

Складність математичного моделювання алгоритмів машинного навчання у сфері розпізнавання зображень визначається сукупністю чинників, які формують обмеження щодо точності, швидкодії та узагальнюваності моделей. Ідеться про багатовимірність вхідних даних, стохастичність і нелінійність процесів навчання, а також обмеження апаратних ресурсів, які накладають вимоги до оптимізації структур алгоритмів. Математичні моделі повинні враховувати неоднорідність даних, складність внутрішньої динаміки нейронних мереж і ризики втрати інформації в разі зменшення розмірності простору ознак. Саме ці фактори формують підґрунтя для виникнення похибок, зниження швидкодії та нестабільності результатів, що потребує їх системної ідентифікації (табл. 2).

Таблиця 2

Фактори складності математичного моделювання алгоритмів розпізнавання зображень

Фактор	Суть складності	Приклад впливу в практиці
Багатовимірність даних	Зростання розмірності простору ознак ускладнює побудову адекватних моделей	У медичній діагностиці під час аналізу МРТ-знімків алгоритм потребує роботи із сотнями зрізів, що сповільнює обчислення
Нелінійність процесів навчання	Взаємодія параметрів у нейронних мережах має хаотичний характер	У системах розпізнавання обличчя малі зміни у вхідному зображенні можуть призводити до кардинально різних вихідних результатів
Стохастичність навчальних процедур	Використання випадкових підходів (стохастичний градієнтний спуск) створює різні траєкторії збіжності	У транспортних системах це призводить до варіативності точності розпізнавання дорожніх знаків за кожного запуску навчання
Обмеження апаратних ресурсів	Великі обсяги даних і глибокі архітектури потребують надвисоких обчислювальних потужностей	У промислових системах контролю якості відбувається затримка обробки потоків із камер через обмеженість GPU
Втрата інформації в разі зменшення розмірності	Методи редукції можуть виключати суттєві ознаки	У біометричних системах дрібні деталі відбитка пальця губляться під час спрощення простору ознак, що знижує точність ідентифікації

Джерело: сформовано авторами на підставі [3, р. 1820–1822; 6, р. 64–65; 7, р. 63; 9, р. 118–119; 12, р. 681–682; 14, р. 2–3]

У реальній практиці зазначені фактори проявляються комплексно і визначають межі застосування моделей. Так, багатовимірність даних у медичній візуалізації змушує створювати гібридні моделі, які одночасно обробляють просторові та часові зрізи, забезпечуючи лікарям швидке виявлення патологій. Нелінійність навчання особливо помітна в системах розпізнавання обличчя: навіть невелике освітлення чи поворот голови можуть кардинально змінити результат, що змушує розробників застосовувати регуляризацію і багаторівневі ансамблі. Стохастичність процесів навчання стає критичною в транспортних системах, де нестабільність розпізнавання знаків може загрожувати безпеці, тому моделювання дає змогу передбачати варіативність результатів ще до впровадження [3, р. 1820–1822]. Обмеження ресурсів найчастіше відчутні в промисловому контролі якості, коли необхідна висока швидкодія для поточкових ліній та моделі доводиться оптимізувати під конкретне обладнання [12, р. 681–682]. Втрата інформації в разі зменшення розмірності особливо небезпечна в біометрії, де навіть мінімальне спрощення може призвести до хибної ідентифікації, що вирішується впровадженням адаптивних методів відбору ознак. Усі ці приклади свідчать, що математичне моделювання виконує не лише пояснювальну, а й прогностичну функцію, даючи можливість врахувати фундаментальні чинники складності ще на етапі проектування алгоритмів.

Методологічні засади побудови математичних моделей у сфері машинного навчання для завдань розпізнавання зображень базуються на поєднанні формальних підходів до опису динаміки навчальних процесів із принципами узагальнення результатів за різними класами об'єктів. Основою є прагнення створити такі моделі, які здатні відтворювати закономірності навчання незалежно від конкретної предметної галузі чи специфіки вхідних даних. Це передбачає використання багаторівневих абстракцій, що дають змогу формально описувати як внутрішні параметричні зміни в архітектурах алгоритмів, так і зовнішню поведінку системи у вигляді точності, стабільності та здатності до перенесення знань. Важливою умовою є забезпечення збалансованості між точністю моделей та їх обчислювальною реалізованістю, що досягається завдяки поєднанню статистичних, оптимізаційних та геометричних методів (табл. 3).

Таблиця 3

Методологічні підходи та інструменти побудови математичних моделей процесів навчання й узагальнення результатів

Методологічний підхід	Сутність	Інструменти реалізації	Приклад застосування
Статистичне моделювання	Опис процесів навчання через імовірнісні розподіли та оцінку варіативності результатів	Scikit-learn, R, пакети для аналізу медичних зображень	Прогноз достовірності діагностики пухлин за МРТ із зазначенням рівня хибнопозитивних випадків
Геометричне моделювання	Представлення даних у вигляді багатовимірних просторів ознак	OpenCV, MATLAB, спеціалізовані алгоритми топологічного аналізу	Біометрична ідентифікація за відбитками пальців або райдужкою ока
Оптимізаційні моделі	Мінімізація функціоналу втрат для забезпечення точності та швидкодії	TensorFlow, PyTorch, GPU-обчислення	Розпізнавання дорожніх знаків у режимі реального часу для автономного транспорту
Моделі перенесення знань	Адаптація попередньо навчених моделей до нових класів без повного перенавчання	ResNet, EfficientNet, HuggingFace Transformers	Швидке перенаштування систем контролю якості у виробництві в разі змінення продукції
Гібридні моделі	Поєднання кількох підходів для підвищення надійності	YOLOv8, Detectron2, системи багатомодального аналізу	Відеоспостереження в аеропортах, де поєднується розпізнавання обличчя та аналіз поведінки

Джерело: сформовано авторами на підставі [2, р. 416–418; 3, р. 1825–1827; 8, р. 1–2; 9, р. 120–121; 12, р. 683–684; 15, р. 65–66]

У сучасних умовах методологічні підходи в поєднанні з інструментами створюють цілісну систему, яка забезпечує надійність і масштабованість алгоритмів розпізнавання зображень [2, р. 414–415]. Статистичне моделювання на базі бібліотек Scikit-learn чи середовищ типу R стало стандартом у медичній діагностиці: під час аналізу МРТ модель не лише видає результат «пухлина / немає пухлини», а й надає розподіл імовірностей, що дає змогу лікарю оцінити ризик хибного рішення. Це дає можливість проводити обґрунтовані клінічні консультації, коли лікар орієнтується не лише на «чорний ящик», а й на зрозумілі статистичні показники.

Геометричне моделювання, реалізоване через OpenCV чи спеціалізовані алгоритми топологічного аналізу, має особливий попит у біометрії. Наприклад, у банківських системах безпеки відбиток пальця представляється у вигляді багатовимірного векторного простору, де навіть найменші відмінності між схожими відбитками дають змогу уникнути помилкової ідентифікації [9, с. 119–120]. Завдяки цьому забезпечується висока надійність доступу до фінансових даних навіть у випадках, коли відбитки частково пошкоджені.

Оптимізаційні моделі на основі TensorFlow та PyTorch, що працюють на графічних процесорах, є критично важливими для автономного транспорту. Відомі приклади Tesla чи Waymo демонструють, що від моменту появи дорожнього знака до формування рішення в системі має пройти лише кілька мілісекунд [7, с. 63–64]. Оптимізація функціоналу втрат дає можливість досягати балансу між швидкістю обробки та точністю, завдяки чому автомобіль реагує адекватно навіть у складних погодних умовах, як-от дощ чи туман.

Моделі перенесення знань на базі ResNet, EfficientNet або платформ HuggingFace стали справжнім проривом для промисловості. Наприклад, якщо фабрика переходить на нову серію мікросхем, то система контролю якості може використати вже навчену модель і швидко підлаштуватися під новий тип продукції без збирання величезних масивів даних [8, с. 1–2; 11]. Це економить тижні чи навіть місяці простою та забезпечує безперервність виробництва.

Гібридні моделі, що комбінують методи й інструменти на кшталт YOLOv8 чи Detectron2, демонструють свою ефективність у сфері безпеки. Сучасні системи спостереження в аеропортах чи на стадіонах здатні не лише розпізнавати обличчя, а й аналізувати поведінкові патерни: тривожні жести, нетипову манеру ходи, скупчення людей [15, с. 67–68]. Це знижує ризик хибних тривог і підвищує здатність систем своєчасно запобігати потенційним інцидентам.

Методологічні підходи та інструменти моделювання формують теоретичну й технологічну основу для розвитку систем комп'ютерного зору, однак на етапі їх практичного впровадження виявляється низка обмежень, що знижують ефективність застосування [3, с. 1820–1822]. Найбільш гострою є проблема обчислювальної складності: високопродуктивні алгоритми вимагають значних обчислювальних ресурсів і споживають багато енергії, що обмежує їх використання у мобільних та вбудованих пристроях. Не менш важливим є бар'єр адаптації, коли моделі, навчені на контрольованих датасетах, втрачають точність у реальних умовах через зміну освітлення, спотворення зображення або часткове перекриття об'єктів.

Додатково постає проблема недостатньої узагальнюваності: навіть невелике відхилення у структурі даних потребує повторного перенавчання, що вимагає часу та значних фінансових витрат [2, с. 417–418; 8, с. 2–3]. Серйозною перешкодою є чутливість до якості вхідних даних, коли шум, артефакти чи низька роздільна здатність призводять до систематичних помилок у класифікації. На практиці це особливо небезпечно у сферах, де рішення приймаються в реальному часі, наприклад у транспортних системах або промислового контролю.

До цього додається проблема масштабованості: моделі, ефективні в лабораторних умовах або на малих вибірках, часто виявляються непридатними в разі розгортання в масштабних системах відеоспостереження чи медичних мережах [3, с. 1826–1827]. Низька пояснюваність складних архітектур поглиблює недовіру до їх використання в критичних галузях, де прозора інтерпретація рішення є обов'язковою [11]. Технічні бар'єри інтеграції з наявними інформаційними системами, відмінності у форматах і стандартах даних, а також відсутність універсальних тестових середовищ іще більше ускладнюють процес упровадження [7, с. 64]. Нарешті, брак спеціалізованих анованих датасетів у таких сферах, як медицина чи оборона, обмежує можливості навчання моделей і стримує їхню ефективність у практичних застосуваннях.

Виявлені проблеми, що обмежують практичне використання математичних моделей у системах комп'ютерного зору, створюють підґрунтя для формування рекомендацій, спрямованих на вдосконалення підходів і підвищення прикладної цінності розробок. Насамперед доцільним є орієнтування на розроблення енергоефективних моделей, здатних працювати на вбудованих чи мобільних пристроях без істотних втрат точності, що відкриває шлях до широкого застосування технологій у медицині, транспорті та побутових сервісах. Важливим напрямом є інтеграція адаптивних механізмів, які дають змогу алгоритмам оперативно пристосовуватися до змін умов середовища, наприклад варіації освітлення чи появи нових класів об'єктів, без потреби повного перенавчання. Перспективним є використання методів explainable AI, що забезпечують інтерпретованість рішень і підвищують довіру до моделей у критично важливих сферах, зокрема в медицині та безпеці.

Ефективною стратегією може стати створення модульних архітектур, які поєднують різні методологічні підходи та забезпечують можливість поступової інтеграції в уже наявні інформаційні системи. Важливу роль відіграє розвиток симуляційних і тестових середовищ, які дають змогу перевіряти стабільність моделей у реалістичних умовах до їх масштабного впровадження. Крім того, доцільно стимулювати формування галузевих анованих датасетів у таких сферах, як медична візуалізація, промисловий контроль чи оборона, що стане основою для якісного навчання та забезпечить покращення узагальнюваності моделей. Поєднання цих рекомендацій формує цілісну стратегію, яка не лише усуває виявлені бар'єри, але й підвищує наукову й практичну значущість математичного моделювання в прикладних технологіях розпізнавання зображень.

Висновки

У процесі дослідження встановлено, що математичне моделювання є ключовим інструментом підвищення ефективності алгоритмів машинного навчання в завданнях розпізнавання зображень. Воно забезпечує формалізоване відображення закономірностей процесів навчання, створює підґрунтя для оптимізації параметрів і структур, а також дає змогу прогнозувати поведінку алгоритмів у різних прикладних середовищах. Наукова новизна полягає в поєднанні методологічних підходів із конкретними інструментами, що формують цілісну основу для побудови стійких і масштабованих систем комп'ютерного зору. Виявлено основні проблеми, які обмежують практичне використання моделей: багатовимірність і неоднорідність даних, нелінійність і стохастичність процесів навчання, високі обчислювальні витрати та чутливість до якості вхідних зображень. До цього додаються бар'єри масштабування, відсутність достатньо репрезентативних датасетів у спеціалізованих сферах, низька пояснюваність рішень і складність інтеграції з наявними інформаційними системами. Сукупність цих чинників формує комплекс викликів, що вимагають системного підходу до моделювання. Сформульовані рекомендації підкреслюють необхідність розроблення енергоефективних та адаптивних моделей, здатних працювати на мобільних і вбудованих пристроях, інтеграції explainable AI для забезпечення довіри користувачів, а також розвитку модульних архітектур із можливістю поступового впровадження. Перспективними напрямками подальших досліджень є створення універсальних тестових середовищ, розробка галузевих анованих датасетів, застосування цифрових близнюків для симуляції процесів навчання та вдосконалення методів перенесення знань, що зменшать потребу повного перенавчання моделей.

Список використаної літератури

1. Neural Networks, Machine Learning, and Image Processing: Mathematical Modeling and Applications / ed. by M. Sahnı, R. Sahnı, J. M. Merigó. Boca Raton : CRC Press, 2022. 220 p. URL: <https://surl.li/cuddxq> (date of access: 08.10.2025).
2. Matuszewski J., Rajkowski A. The use of machine learning algorithms for image recognition. In: *Radioelectronic Systems Conference 2019*. SPIE, 2020. Vol. 11442. P. 412–422. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2565546>.
3. Rani P., Kotwal S., Manhas J., Sharma V., Sharma S. Machine learning and deep learning based computational approaches in automatic microorganisms image recognition: methodologies, challenges, and developments. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2022. Vol. 29, No. 3. P. 1801–1837. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09639-x>.
4. Li Y. Research and application of deep learning in image recognition. In: *2022 IEEE 2nd International Conference on Power, Electronics and Computer Applications (ICPECA)*. Shenyang, China, 2022. P. 994–999. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPECA53709.2022.9718847>.

5. He B., Lu Q., Lang J., Yu H., Peng C., Bing P., Tian G. A new method for CTC images recognition based on machine learning. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020. Vol. 8. Article 897. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00897>.
6. Wang P., Fan E., Wang P. Comparative analysis of image classification algorithms based on traditional machine learning and deep learning. *Pattern Recognition Letters*. 2021. Vol. 141. P. 61–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2020.07.042>.
7. Carpenter C. Machine-learning image recognition enhances rock classification. *Journal of Petroleum Technology*. 2020. Vol. 72, No. 10. P. 63–64. DOI: <https://doi.org/10.2118/1020-0063-JPT>.
8. Li L. Application of deep learning in image recognition. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1693, No. 1. Article 012128. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1693/1/012128>.
9. Lou G., Shi H. Face image recognition based on convolutional neural network. *China Communications*. 2020. Vol. 17, No. 2. P. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.23919/JCC.2020.02.010>.
10. Khan A. A., Laghari A. A., Awan S. A. Machine learning in computer vision: a review. *EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems*. 2021. Vol. 8, No. 32. DOI: <https://doi.org/10.4108/eai.21-4-2021.169418>.
11. Henaff O. Data-efficient image recognition with contrastive predictive coding. In: *Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning (ICML 2020)*. *Proceedings of Machine Learning Research*. 2020. Vol. 119. P. 4182–4192. URL: <https://proceedings.mlr.press/v119/henaff20a.html> (date of access: 08.03.2025).
12. Ebrahimi M. S., Abadi H. K. Study of residual networks for image recognition. In: Arai K. (ed.) *Intelligent Computing. Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham : Springer, 2021. Vol. 284. P. 675–686. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-80126-7_53.
13. Henderson M., Shakya S., Pradhan S., Cook T. Quantum neural networks: powering image recognition with quantum circuits. *Quantum Machine Intelligence*. 2020. Vol. 2, No. 1. Article 2. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42484-020-00012-y>.
14. Jiang F., Lu Y., Chen Y., Cai D., Li G. Image recognition of four rice leaf diseases based on deep learning and support vector machine. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 179. Article 105824. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105824>.
15. Singh C. Machine learning in pattern recognition. *European Journal of Engineering and Technology Research*. 2023. Vol. 8, No. 2. P. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.24018/ejeng.2023.8.2.3025>.

References

1. Sahni, M., Sahni, R., & Merigó, J. M. (Eds.). (2022). *Neural networks, machine learning, and image processing: Mathematical modeling and applications*. CRC Press. Retrieved from <https://surl.li/cuddxq>
2. Matuszewski, J., & Rajkowski, A. (2020). The use of machine learning algorithms for image recognition. In *Radioelectronic Systems Conference 2019* (Vol. 11442, pp. 412–422). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2565546>
3. Rani, P., Kotwal, S., Manhas, J., Sharma, V., & Sharma, S. (2022). Machine learning and deep learning based computational approaches in automatic microorganisms image recognition: Methodologies, challenges, and developments. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(3), 1801–1837. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09639-x>
4. Li, Y. (2022). Research and application of deep learning in image recognition. In *2022 IEEE 2nd International Conference on Power, Electronics and Computer Applications (ICPECA)* (pp. 994–999). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPECA53709.2022.9718847>
5. He, B., Lu, Q., Lang, J., Yu, H., Peng, C., Bing, P., & Tian, G. (2020). A new method for CTC images recognition based on machine learning. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, Article 897. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00897>
6. Wang, P., Fan, E., & Wang, P. (2021). Comparative analysis of image classification algorithms based on traditional machine learning and deep learning. *Pattern Recognition Letters*, 141, 61–67. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2020.07.042>
7. Carpenter, C. (2020). Machine-learning image recognition enhances rock classification. *Journal of Petroleum Technology*, 72(10), 63–64. <https://doi.org/10.2118/1020-0063-JPT>
8. Li, L. (2020). Application of deep learning in image recognition. *Journal of Physics: Conference Series*, 1693(1), Article 012128. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1693/1/012128>
9. Lou, G., & Shi, H. (2020). Face image recognition based on convolutional neural network. *China Communications*, 17(2), 117–124. <https://doi.org/10.23919/JCC.2020.02.010>
10. Khan, A. A., Laghari, A. A., & Awan, S. A. (2021). Machine learning in computer vision: A review. *EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems*, 8(32). <https://doi.org/10.4108/eai.21-4-2021.169418>
11. Henaff, O. (2020). Data-efficient image recognition with contrastive predictive coding. In *Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning (ICML 2020)* (*Proceedings of Machine Learning Research*, Vol. 119, pp. 4182–4192). Retrieved from <https://proceedings.mlr.press/v119/henaff20a.html>

12. Ebrahimi, M. S., & Abadi, H. K. (2021). Study of residual networks for image recognition. In K. Arai (Ed.), *Intelligent computing (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 284, pp. 675–686)*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80126-7_53
13. Henderson, M., Shakya, S., Pradhan, S., & Cook, T. (2020). Quantvolutional neural networks: Powering image recognition with quantum circuits. *Quantum Machine Intelligence, 2*(1), Article 2. <https://doi.org/10.1007/s42484-020-00012-y>
14. Jiang, F., Lu, Y., Chen, Y., Cai, D., & Li, G. (2020). Image recognition of four rice leaf diseases based on deep learning and support vector machine. *Computers and Electronics in Agriculture, 179*, Article 105824. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105824>
15. Singh, C. (2023). Machine learning in pattern recognition. *European Journal of Engineering and Technology Research, 8*(2), 63–68. <https://doi.org/10.24018/ejeng.2023.8.2.3025>

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

О. М. КОРОБКОВА

доцент кафедри управління портовою і сервісною діяльністю
на водному транспорті
Одеський національний морський університет
ORCID: 0000-003-2279-5820

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ МИТНОГО ОГЛЯДУ ЗА ДОПОМОГОЮ СИМУЛЯЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ З УРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕНИХ РЕСУРСІВ

Актуальність дослідження зумовлена зростанням інтенсивності міжнародних транспортних потоків, ускладненням логістичних ланцюгів та підвищенням вимог до митної безпеки в умовах обмежених кадрових і технічних ресурсів пунктів пропуску. У таких умовах традиційні підходи до організації митного огляду є недостатньо ефективними, оскільки не враховують стохастичного характеру транспортних потоків, нелінійних ефектів перевантаження та необхідності балансування між швидкістю митного оформлення й глибиною контролю. Це зумовлює потребу у використанні кількісних методів аналізу та обґрунтованих інструментів підтримки управлінських рішень.

Метою статті є оптимізація системи митного огляду на основі застосування симуляційного моделювання транспортних потоків в умовах обмежених ресурсів для досягнення збалансованого співвідношення між швидкістю виконання митних процедур та ефективністю виявлення митних правопорушень.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні дискретно-подійного симуляційного моделювання в середовищах Simul8 та Arena, методів Монте-Карло для урахування стохастичної невизначеності, аналізу чутливості для виявлення критичних параметрів системи, а також елементів багатокритеріальної оптимізації. Процеси митного огляду подано у вигляді системи масового обслуговування з обмеженими ресурсами та змінною інтенсивністю потоків.

Результати дослідження засвідчують, що систему митного огляду доцільно розглядати як нелінійну стохастичну систему, у якій пропускна спроможність і результативність контролю перебувають у конфліктному взаємозв'язку. Встановлено наявність порогових значень інтенсивності транспортних потоків і ресурсного забезпечення, за яких відбувається різке зростання часу митного огляду та зниження ймовірності виявлення правопорушень. Доведено, що гнучкий розподіл кадрових і технічних ресурсів є ефективнішим, ніж екстенсивне збільшення кількості поглиблених перевірок, а надмірна інтенсифікація контролю характеризується ефектом насичення.

У висновках підсумовано, що симуляційне моделювання забезпечує науково обґрунтований інструмент оптимізації митного огляду в умовах невизначеності та обмежених ресурсів. Доведено доцільність використання оптимізаційної моделі вибору управлінських рішень для підтримання стійкого балансу між швидкістю митного оформлення та митною безпекою.

Перспективи подальших досліджень можуть бути пов'язані з інтеграцією даних реального часу, розвитком адаптивних ризик-орієнтованих алгоритмів та впровадженням цифрових систем підтримки прийняття рішень у діяльність митних органів.

Ключові слова: транспортні потоки, пункт пропуску, імітаційна модель, система масового обслуговування, управлінські рішення, ризик-орієнтований контроль, пропускна спроможність, стохастична невизначеність, ресурсообмежені системи.

О. М. KOROBKOVA

Associate Professor at the Department of Port and Service Management
in Water Transport
Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-003-2279-5820

OPTIMIZATION OF THE CUSTOMS INSPECTION SYSTEM USING SIMULATION MODELING UNDER RESOURCE CONSTRAINTS

Relevance of the study is determined by the increasing intensity of international transport flows, growing complexity of logistics chains, and stricter requirements for customs security under persistent constraints of human, technical, and time resources at border crossing points. Under these conditions, traditional approaches to organizing customs inspections

prove insufficient, as they fail to adequately account for the stochastic nature of transport flows, nonlinear congestion effects, and the need to balance inspection speed with control depth. This substantiates the necessity of applying quantitative and simulation-based methods to support evidence-based managerial decisions.

The aim of the article is to optimize the customs inspection system through the application of simulation modeling of transport flows under resource constraints in order to achieve a balanced ratio between the speed of customs procedures and the effectiveness of detecting customs violations.

Research methods are based on discrete-event simulation modeling implemented in Simul8 and Arena environments, the Monte Carlo method to account for stochastic uncertainty, sensitivity analysis to identify critical system parameters, and elements of multi-criteria optimization. Customs inspection processes are represented as a queuing system with limited resources and variable flow intensity.

Research results demonstrate that the customs inspection system should be interpreted as a nonlinear stochastic system in which throughput capacity and inspection effectiveness are in a conflicting relationship. Threshold values of transport flow intensity and resource availability have been identified, beyond which inspection time increases sharply while the probability of detecting violations declines. It has been proven that flexible allocation of human and technical resources yields higher efficiency than extensive intensification of control measures, while excessive inspection rigor exhibits a saturation effect.

The conclusions summarize that simulation modeling provides a scientifically sound tool for optimizing customs inspection in conditions of uncertainty and limited resources. The feasibility of using an optimization model for selecting management decisions to maintain a stable balance between the speed of customs clearance and customs security has been proven. Prospects for further research may be related to the integration of real-time data, the development of adaptive risk-oriented algorithms, and the introduction of digital decision support systems into the activities of customs authorities.

Key words: transport flows, border crossing point, discrete-event simulation, queuing system, managerial decision-making, risk-based control, throughput capacity, stochastic uncertainty, resource-constrained systems.

Постановка проблеми

Сучасні системи митного огляду функціонують в умовах зростання обсягів зовнішньоекономічних операцій, ускладнення логістичних ланцюгів та підвищених вимог до безпеки державного кордону, що істотно посилює навантаження на митні органи. За обмеженості матеріально-технічних, кадрових і часових ресурсів неефективна організація процедур митного контролю призводить до накопичення черг, збільшення часу оформлення вантажів, зростання транзакційних витрат для бізнесу та підвищення ризиків пропуску порушень митного законодавства. Водночас надмірне посилення контрольних заходів без урахування ресурсних обмежень знижує пропускну спроможність пунктів пропуску та негативно впливає на конкурентоспроможність національної економіки.

У цьому контексті актуалізується наукова проблема пошуку збалансованих управлінських рішень, які забезпечують оптимальне поєднання рівня митної безпеки та ефективності логістичних потоків. Симуляційне моделювання є інструментом, що дає змогу формалізувати складну динаміку митного огляду, відтворити взаємодію потоків вантажів, персоналу, технічних засобів контролю та інформаційних систем, а також дослідити наслідки різних управлінських сценаріїв без втручання у реальний процес. Використання таких моделей створює підґрунтя для науково обґрунтованого вибору параметрів системи митного огляду в умовах невизначеності та ресурсних обмежень.

З практичного погляду розв'язання зазначеної проблеми тісно пов'язане із завданнями підвищення пропускну спроможності пунктів пропуску, зниження часу митного оформлення, раціонального розподілу інспекційних ресурсів і мінімізації ризиків контрабанди та митних правопорушень. На науковому рівні це відповідає пріоритетам розвитку методів системного аналізу, теорії масового обслуговування та імітаційного моделювання у сфері публічного управління й митної справи, а також формує основу для впровадження доказових підходів до прийняття управлінських рішень у діяльності митних органів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд сучасних досліджень дозволяє виокремити чотири взаємопов'язані наукові напрями. Перший науковий напрям пов'язаний із застосуванням імітаційного моделювання та теорії масового обслуговування для дослідження пропускну спроможності митних і суміжних логістичних об'єктів. Зокрема, Н. Лужанська (N. Luzhanska) розглядає митні вантажні комплекси як системи масового обслуговування, що дає змогу кількісно оцінювати вплив кількості каналів огляду, інтенсивності потоків та кадрових обмежень на тривалість митних процедур [1]. Імітаційне моделювання з евристичними та метаевристичними алгоритмами для оптимізації розподілу обмежених ресурсів у портових логістичних системах, що має пряму методичну релевантність для організації митного огляду транспортних засобів, поєднують Х.-П. Гсу та співавтори (Н.-Р. Hsu et al.) [2]. Симуляційно-орієнтовану оптимізацію до систем запису вантажівок у контейнерних терміналах застосовують Д. К. Бетт та колеги (D. K. Bett et al.), доводячи можливість зменшення черг і перевантажень без додаткового розширення інфраструктури [3].

Другий науковий напрям охоплює алгоритмічну оптимізацію митного огляду на основі цифрової ідентифікації, автоматизованого планування та технологій штучного інтелекту. Так, метод автоматичного планування переміщення транспортних засобів митного огляду з використанням автомобільної електронної ідентифікації та біометричного розпізнавання, що дозволяє скорочувати час контролю без збільшення кількості персоналу, пропонує

колектив науковців на чолі з С. Чжоу (S. Zhou et al.) [4]. Використання технологій штучного інтелекту в машинному митному огляді аналізують Ц. Цао (Q. Cao) та С. Чжен (X. Zheng), демонструючи їхній потенціал у стандартизації рішень та зменшенні навантаження на людські ресурси [5]. Митний контроль у контексті еволюційних ігор у складних мережах, що створює теоретичне підґрунтя для побудови симуляційних моделей стратегічної поведінки учасників митного процесу, розглядають Ю. Ву та співавтори (Y. Wu et al.) [6].

Третій науковий напрям пов'язаний з інтеграцією симуляційного моделювання з управлінням ризиками, мультимодальною логістикою та кризовими умовами функціонування транспортно-митних систем. Зокрема, ризик-орієнтовану симуляційну оптимізацію для управління мультимодальними логістичними операціями, що методично наближає дослідження до завдань митного контролю високоризикових вантажів, застосовують К. Попа та однокласники (C. Pora et al.) [7]. Гібридний підхід *simulation–optimization* для планування логістики в умовах невизначеності та жорстких ресурсних обмежень, характерних для воєнного часу, пропонують М. Резек та колеги (M. Rezek et al.) [8]. Можливості глибинного навчання з підкріпленням для оптимізації транскордонних мультимодальних маршрутів у реальному часі, що може бути інтегровано з симуляційними моделями митного огляду, досліджує колектив учених під керівництвом Ю. Сі (Y. Xi et al.) [9].

Четвертий науковий напрям охоплює економічні, фінансові та аналітичні аспекти, які формують системні ресурсні обмеження функціонування митних органів. Так, В. Рудевська та співавтори (V. Rudevskaya et al.) досліджують вплив ліквідності банківської системи в умовах війни на фінансування державного сектору, що опосередковано визначає можливості ресурсного забезпечення митних інституцій [10]. Проблеми бюджетного планування в системі місцевих фінансів аналізують О. Стороженко та М. Настенко, акцентуючи на хронічному дефіциті ресурсів як стримувальному чиннику модернізації контрольної інфраструктури [11]. Потенціал Big Data-аналітики для прогнозування логістичних потоків, що може використовуватися як інформаційна основа для симуляційних моделей навантаження митних пунктів, демонструє К. Склярєнко (K. Skliarenko) [12]. Підходи до оцінювання ризиків у зовнішньоекономічній діяльності на основі нечіткої логіки та нейронних мереж узагальнює колектив науковців на чолі з Н. Ло (N. Luo et al.), доповнюючи симуляційне моделювання інструментами підтримки управлінських рішень [13]. Оптимізацію ресурсних систем за жорстких зовнішніх обмежень, що є методично релевантним для аналізу ефективності використання обмежених ресурсів у державному управлінні, досліджують Дж. Ванг та колеги (J. Wang et al.) [14]. Міждисциплінарне підґрунтя для інтеграції симуляційного моделювання та штучного інтелекту в стратегічних системах управління формує у своєму узагальнювальному огляді М. С. Р. Джахід (M. S. R. Jahid) [15].

Попри значний обсяг наукових досліджень у сфері митного контролю, оптимізація системи митного огляду залишається недостатньо опрацьованою з позиції її функціонування як стохастичної транспортно-логістичної системи з обмеженими ресурсами. Найявні підходи мають переважно фрагментарний характер, через що неможливо кількісно оцінити компроміс між швидкістю митного огляду та ефективністю виявлення правопорушень, а також не враховують порогові режими перевантаження пунктів пропуску. Обмеженням залишається використання симуляційного моделювання в поєднанні з імовірнісними методами та аналізом чутливості для підтримки управлінських рішень. Запропоноване дослідження заповнює ці прогалини шляхом системного застосування симуляційного моделювання транспортних потоків, що дає змогу кількісно дослідити вплив основних параметрів на результати митного огляду та розробити оптимізаційну модель вибору управлінських рішень для досягнення балансу між пропускнуою спроможністю й митною безпекою.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є оптимізація системи митного огляду шляхом застосування симуляційного моделювання транспортних потоків в умовах обмежених ресурсів для досягнення збалансованого співвідношення між швидкістю проведення митних процедур та ефективністю виявлення митних правопорушень.

Для досягнення поставленої мети в статті передбачено розв'язання таких завдань:

- 1) проаналізувати систему митного огляду як частину транспортно-логістичної інфраструктури та визначити основні чинники, що формують її пропускну спроможність і результативність контролю;
- 2) розробити імітаційну модель пункту пропуску на основі симуляційного моделювання (Simul8 / Arena, методи Монте-Карло, аналіз чутливості) для кількісної оцінки впливу транспортних потоків і розподілу ресурсів на час огляду та ймовірність виявлення порушень;
- 3) запропонувати оптимізаційну модель вибору управлінських рішень, спрямовану на досягнення балансу між пропускнуою спроможністю пункту пропуску та ефективністю митного контролю.

Викладення основного матеріалу дослідження

Система митного огляду як частина транспортно-логістичної інфраструктури є інтегрованим організаційно-технологічним комплексом, у межах якого поєднуються процеси фізичного та документарного контролю, управління транспортними потоками й ризик-орієнтований відбір об'єктів перевірки. Її структурно-функціональні особливості визначаються взаємодією інфраструктурних можливостей пунктів пропуску, кадрового потенціалу, технічних засобів контролю та інформаційно-аналітичних інструментів. У сучасних умовах зростання

інтенсивності перевезень та обмеженості ресурсів пропускна спроможність та результативність митного контролю визначаються не стільки нарощуванням окремих елементів системи, скільки узгодженістю їх функціонування та здатністю адаптуватися до змін транспортного навантаження (табл. 1).

Таблиця 1

Основні структурно-функціональні чинники системи митного огляду та їхній вплив на пропускну спроможність і результативність контролю

Чинник	Характеристика	Вплив на пропускну спроможність	Вплив на результативність контролю
Інтенсивність транспортних потоків	Кількість транспортних засобів і вантажів за одиницю часу	Зумовлює рівень завантаження системи та ймовірність утворення черг	Ускладнює фокусування контролю на ризикових об'єктах у пікові періоди
Кадрові ресурси	Кількість і рівень підготовки митних інспекторів	Визначають швидкість обслуговування та можливість паралельних операцій	Впливають на якість оцінки ризиків і прийняття рішень
Технічні засоби контролю	Сканери, вагові комплекси, системи ідентифікації	Скорочують тривалість огляду без фізичного розкриття вантажів	Підвищують імовірність виявлення прихованих порушень
Інформаційно-аналітичні системи	Системи управління ризиками, бази даних	Оптимізують час прийняття рішень щодо форми огляду	Забезпечують селективність і точність контролю
Організація процесу огляду	Послідовність та паралельність процедур	Мінімізує простой та вузькі місця в системі	Підвищує системність і логічну завершеність контролю

Джерело: сформовано автором на основі [1, с. 37; 5; 6, с. 52; 7, с. 659].

У практиці функціонування пунктів пропуску зазначені чинники взаємодіють у режимі постійної динаміки, що зумовлює необхідність їх комплексного врахування при управлінні митним оглядом. Наприклад, у періоди сезонного зростання вантажопотоків або пікової інтенсивності пасажирського руху обмеженість кадрових ресурсів швидко трансформується в затримки оформлення, навіть за наявності сучасних технічних засобів [1, с. 37]. Водночас застосування інформаційно-аналітичних систем управління ризиками дозволяє зменшувати частку суцільних перевірок, спрямовуючи інспекційні ресурси на підвищено ризикові вантажі та транспортні засоби. З науково-практичного погляду це свідчить, що підвищення пропускної спроможності митного огляду не обов'язково потребує екстенсивного збільшення ресурсів. Значно ефективнішим є оптимізація організації процесів, синхронізація дій персоналу та використання технічних і аналітичних інструментів для прийняття рішень у реальному часі. У сучасних умовах така система функціонує як адаптивна транспортна підсистема, здатна підтримувати баланс між швидкістю митного оформлення та результативністю виявлення порушень, що має вирішальне значення для ефективності міжнародних перевезень і митної безпеки держави.

Симуляційне моделювання процесів митного огляду ґрунтується на поданні пункту пропуску як стохастичної дискретно-подійної системи, у межах якої транспортні засоби послідовно проходять етапи контролю з випадковою тривалістю та обмеженою доступністю ресурсів. Застосування імітаційних моделей у середовищах Simul8 та Arena дає змогу адекватно відтворити логіку функціонування пункту пропуску без надмірних аналітичних спрощень, а поєднання з методами Монте-Карло та аналізом чутливості дозволяє врахувати невизначеність параметрів і оцінити стабільність результатів за різних сценаріїв навантаження (табл. 2).

Таблиця 2

Методичні компоненти симуляційного моделювання пункту пропуску та їхнє практичне значення

Компонент моделі	Характеристика	Практичне значення
Концептуалізація процесу огляду	Логічне подання етапів митного контролю та потоків	Забезпечує формалізацію процесу для подальшого експериментування
Стохастичні вхідні параметри	Розподіли ймовірностей інтенсивності прибуття та тривалості операцій	Дозволяють моделювати різні режими навантаження без припущення детермінованості
Реалізація в Simul8 / Arena	Створення дискретно-подійної імітаційної моделі	Надає інструмент для порівняння альтернативних варіантів організації роботи
Метод Монте-Карло	Багаторазовий прогін моделі з випадковими реалізаціями	Дає змогу оцінювати ризики перевантаження і крайні сценарії затримок
Аналіз чутливості	Варіювання основних параметрів моделі	Виявляє чинники, зміна яких найбільш суттєво впливає на результати

Джерело: сформовано автором на основі [1, с. 37; 2, с. 64653; 3; 8, с. 423]

У діяльності митних органів симуляційна модель пункту пропуску використовується для попередньої оцінки рішень, що мають потенційно значний вплив на швидкість оформлення та рівень контролю. Наприклад, перед упровадженням нових профілів ризику або зміною алгоритму спрямування транспортних засобів на поглиблений

огляд модель дозволяє перевірити, як це позначиться на середньому часі перебування в пункті пропуску та на розподілі навантаження між інспекційними зонами [8, с. 423]. У таких експериментах метод Монте-Карло забезпечує статистично обґрунтоване уявлення про варіативність результатів, що є важливим для ухвалення рішень в умовах невизначеності. З науково-практичного погляду особливу цінність має аналіз чутливості, який дає можливість ідентифікувати параметри, критичні для стабільності функціонування системи. Практика показує, що зміна незначної частки оглядів, спрямованих на поглиблений контроль, або коригування часу виконання окремих процедур може мати сильніший ефект, ніж збільшення загальної кількості ресурсів [3]. Таким чином, симуляційне моделювання в сучасних умовах перетворюється на інструмент обґрунтованої модернізації митних процедур, що дозволяє досягти балансу між оперативністю оформлення та ефективністю митного контролю без надмірних інвестицій у фізичну інфраструктуру.

Дослідження впливу параметрів симуляційної моделі на показники функціонування митного огляду ґрунтуються на аналізі взаємозалежності між інтенсивністю транспортних потоків, структурою використання кадрових і технічних ресурсів та результативними показниками системи. У стохастичних умовах пункту пропуску саме зміна інтенсивності прибуття транспортних засобів і конфігурації ресурсів визначає характер формування черг, середній та граничний час митного огляду, а також імовірність виявлення митних правопорушень. Симуляційне моделювання дає змогу простежити нелінійні ефекти перевантаження системи, коли незначне зростання потоку або нераціональний розподіл інспекторів і технічних засобів призводять до диспропорційного збільшення затримок і водночас до зниження ефективності контролю (табл. 3).

Таблиця 3

Вплив основних параметрів симуляційної моделі на показники митного огляду

Параметр моделі	Варіанти зміни	Вплив на час митного огляду	Вплив на імовірність виявлення правопорушень
Інтенсивність транспортних потоків	Низька, середня, пікова	Зі зростанням інтенсивності різко зростає час очікування та огляду	У пікових режимах імовірність знижується через дефіцит уваги та часу
Кадрове забезпечення	Фіксована кількість, гнучкий перерозподіл	Гнучкий розподіл зменшує черги та пікові затримки	Підвищує стабільність результатів контролю
Технічні засоби контролю	Мінімальна та розширена конфігурації	Скорочують тривалість огляду окремих транспортних засобів	Дають змогу виявляти складні та приховані порушення
Частка поглиблених оглядів	Низька – середня – висока	Надмірна частка подовжує процес і створює вузькі місця	Зростає до певного порога, після чого ефект насичується
Комбіновані сценарії	Одновременна зміна кількох параметрів	Дає змогу знайти оптимальні режими роботи	Забезпечує баланс між швидкістю та ефективністю контролю

Джерело: сформовано автором на основі [1, с. 37; 3; 4; 8, с. 428; 13, с. 6–7].

У науково-практичному вимірі результати аналізу параметрів симуляційної моделі дають змогу інтерпретувати роботу пункту пропуску як систему з чітко вираженими критичними режимами функціонування. Практика свідчить, що за помірної інтенсивності транспортних потоків система зберігає квазісталу пропускну спроможність навіть за обмеженого кадрового й технічного забезпечення, оскільки часові резерви дозволяють компенсувати коливання тривалості окремих процедур [13, с. 6]. Водночас наближення інтенсивності прибуття транспортних засобів до граничних значень зумовлює нелінійний ефект перевантаження, коли незначне зростання потоку спричиняє непропорційне збільшення часу митного огляду, що є критичним як для логістичної ефективності, так і для якості контролю.

Симуляційні експерименти дають змогу оцінити доцільність різних управлінських рішень у пікових режимах. Моделювання показує, що гнучкий перерозподіл інспекційного персоналу або тимчасова зміна функціональних ролей часто забезпечують суттєвіше скорочення часу огляду, ніж механічне збільшення частки поглиблених перевірок [4]. Інтеграція додаткових технічних засобів контролю в межах ризик-орієнтованого підходу дозволяє зберегти прийнятний рівень імовірності виявлення правопорушень навіть за підвищеного навантаження. Виявлено також ефект насичення контрольних заходів: збільшення частки поглиблених оглядів підвищує результативність лише до певного порогового рівня, після чого зростає час обслуговування, формуються стійкі черги, а ймовірність виявлення порушень знижується. У практичному вимірі це означає, що ефективність митного контролю забезпечується не максимізацією перевірок, а оптимальним поєднанням інтенсивності потоків, розподілу персоналу та застосування технічних засобів. Таким чином, дослідження впливу параметрів симуляційної моделі має безпосереднє прикладне значення, оскільки дозволяє ідентифікувати критичні режими роботи пункту пропуску та оцінювати наслідки управлінських рішень до їх упровадження.

Оптимізація системи митного огляду супроводжується комплексом взаємопов'язаних науково-практичних проблем, основною з яких є обмеженість кадрових, технічних і часових ресурсів, що за зростання обсягів перевезень трансформуються у структурну перевантаженість пунктів пропуску. Стохастичний характер транспортних потоків,

сезонні й добові піки, а також непередбачувані зміни маршрутів знижують ефективність жорстко регламентованих моделей і потребують адаптивних механізмів управління, здатних реагувати на динамічні зміни параметрів системи [6, с. 52]. Ускладнювальним чинником є інформаційна невизначеність митних ризиків, зумовлена неповнотою та асиметрією даних, що підвищує ймовірність як помилкових спрацьовувань, так і пропуску правопорушень. Важливою проблемою залишається постійна потреба в компромісі між швидкістю митного обслуговування та глибиною контролю, адже посилення перевірок суперечить завданню прискорення проходження пунктів пропуску, тоді як пріоритет швидкості підвищує ризики для митної безпеки [12]. В умовах обмежених ресурсів досягнення оптимального балансу ускладнюється нелінійним характером ефектів управлінських рішень та їх відтермінованим проявом у часі.

У цьому контексті модель оптимізаційного вибору управлінських рішень у системі митного огляду розглядається як формалізований інструмент підтримки прийняття рішень, спрямований на досягнення стійкого балансу між пропускнуною спроможністю та результативністю контролю. Її відмінність полягає в інтеграції симуляційного моделювання, імовірнісних оцінок ризиків і багатокритеріальної оптимізації на основі методів Монте-Карло та аналізу чутливості, що забезпечує врахування не лише середніх значень показників, а й граничних сценаріїв функціонування системи (рис. 1).

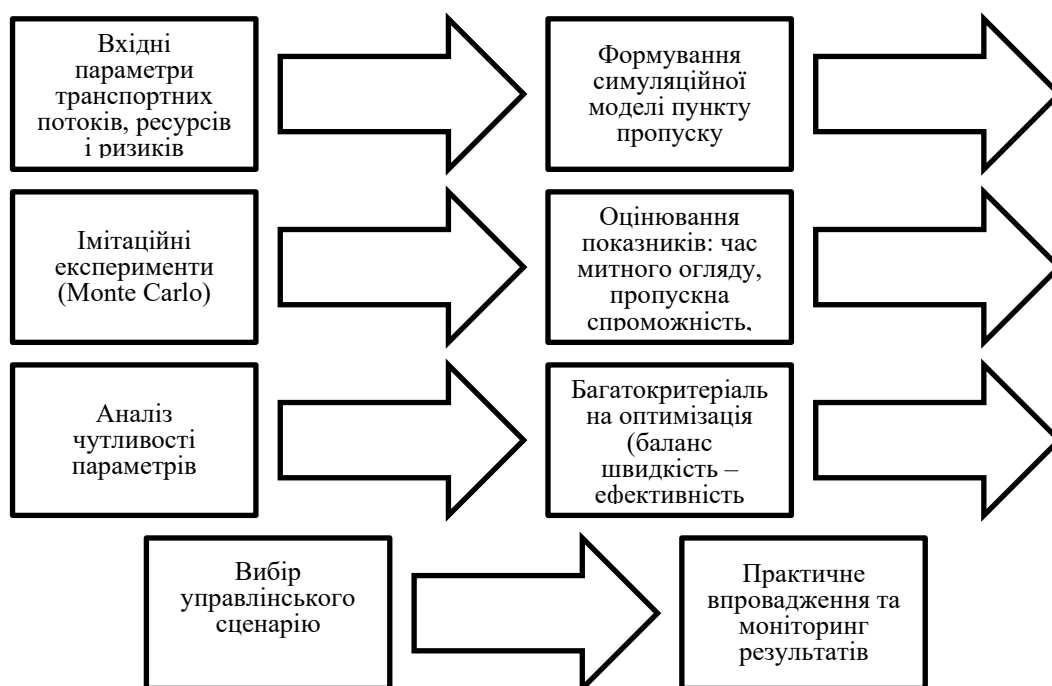


Рис. 1. Блок-схема оптимізаційної моделі управлінських рішень у системі митного огляду

Джерело: власна розробка автора

Практичне функціонування цієї моделі передбачає послідовний перехід від аналізу вихідних умов роботи пункту пропуску до вибору обґрунтованих управлінських рішень. На початковому етапі до моделі надходять дані про інтенсивність і структуру транспортних потоків, доступні кадрові та технічні ресурси, а також імовірнісні оцінки митних ризиків. На їх основі налаштовується симуляційна модель, яка відтворює реальні режими роботи пункту пропуску. Подальше багаторазове програвання сценаріїв за методом Монте-Карло дає змогу отримати статистичні розподіли часу митного огляду та результативності контролю, що є принципово важливим для управління в умовах невизначеності. Наступним кроком є аналіз чутливості, який дозволяє ідентифікувати параметри, зміна яких найбільш суттєво впливає на досягнення цільового балансу. Саме на цій основі реалізується багатокритеріальна оптимізація, де управлінські сценарії оцінюються не за одним показником, а за сукупністю критеріїв, що відображають як швидкість обслуговування, так і ефективність виявлення правопорушень. Обраний сценарій упроваджується в практичну діяльність митного органу, після чого здійснюється моніторинг основних показників і коригування параметрів моделі з урахуванням фактичних результатів. Унаслідок застосування такої моделі митні органи отримують інструмент адаптивного управління, який дозволяє завчасно оцінювати наслідки управлінських рішень, уникати критичних режимів перевантаження та забезпечувати стабільний баланс між пропускнуною спроможністю пункту пропуску й митною безпекою. Це підвищує обґрунтованість управлінських рішень, знижує ризики неефективного використання ресурсів і створює передумови для системного вдосконалення митних процедур у сучасних транспортно-логістичних умовах.

Висновки

У результаті проведеного дослідження з'ясовано, що система митного огляду функціонує як стохастична багато-параметрична система, у якій пропускна спроможність пункту пропуску та ефективність виявлення митних правопорушень перебувають у конфліктному, нелінійному взаємозв'язку. Доведено, що орієнтація виключно на посилення контрольних процедур або, навпаки, на пришвидшення оформлення без урахування ресурсних обмежень призводить до втрати системної ефективності та зростання операційних ризиків. Обґрунтовано доцільність застосування симуляційного моделювання, методів Монте-Карло та аналізу чутливості як науково коректного інструментарію дослідження митного огляду в умовах невизначеності. Встановлено наявність критичних режимів роботи пунктів пропуску та порогових значень інтенсивності транспортних потоків і ресурсного забезпечення, за яких система переходить у нестійкий стан із різким збільшенням часу митного огляду та зниженням результативності контролю. Доведено, що гнучкий розподіл кадрових і технічних ресурсів забезпечує значно ефективніше підвищення пропускної спроможності порівняно з екстенсивним нарощуванням кількості поглиблених перевірок. Виявлено також ефект насичення контрольних заходів, коли подальше збільшення їхньої інтенсивності не підвищує, а знижує загальну ефективність митного контролю. Визначено основні проблеми оптимізації митного огляду, пов'язані з ресурсними обмеженнями, стохастичністю транспортних потоків, інформаційною невизначеністю ризиків та недостатньою інтеграцією управлінських компонентів. Показано, що локальні управлінські рішення не забезпечують сталого ефекту без системного моделювання та кількісної оцінки альтернативних сценаріїв. На цій основі розроблено оптимізаційну модель вибору управлінських рішень, яка формалізує досягнення балансу між швидкістю митного огляду й ефективністю виявлення правопорушень та підвищує обґрунтованість використання обмежених ресурсів.

Перспективи подальших досліджень можуть бути пов'язані з інтеграцією даних реального часу, розвитком адаптивних алгоритмів ризик-менеджменту та формуванням цифрових систем підтримки управлінських рішень у митній сфері.

Список використаної літератури

1. Luzhanska N. Simulation and optimization of freight customs complexes based on queuing systems. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2020. Вип. 19. С. 37–42. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2020/208693>
2. Hsu H.-P., Chou C.-C., Wang C.-N. Heuristic/Metaheuristic-Based Simulation Optimization Approaches for Integrated Scheduling of Yard Crane, Yard Truck, and Quay Crane Considering Import and Export Containers. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 64650–64670. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3180752>
3. Bett D. K., Ali I., Gheith M., Eltawil A. Simulation-based optimization of truck appointment systems in container terminals: A dual transactions approach with improved congestion factor representation. *Logistics*. 2024. Vol. 8, № 3. Article 80. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics8030080>
4. Popa C., Stefanov O., Goia I., Atodiresei D. Risk-Based Optimization of Multimodal Oil Product Operations Through Simulation and Workflow Modeling. *Logistics*. 2025. Vol. 9, № 3. Article 79. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics9030079>
5. Zhou S., Zhang N., Duan Q., Xiao J., Yang J. Automatic Scheduling Method for Customs Inspection Vehicle Relocation Based on Automotive Electronic Identification and Biometric Recognition. *Algorithms*. 2024. Vol. 17, № 11. Article 483. DOI: <https://doi.org/10.3390/a17110483>
6. Cao Q., Zheng X. Application of artificial intelligence technology in the supervision of customs clearance machine inspection. *World Customs Journal*. 2024. Vol. 18, № 2. P. 51–76. DOI: <https://doi.org/10.55596/001c.122754>
7. Wu Y., Xue C., Li S. Optimization Analysis of Customs Supervision Strategy Based on Complex Network Evolutionary Game. In: *Proceedings of the 2022 International Conference on Bigdata Blockchain and Economy Management (ICBBEM 2022)*. Atlantis Press, 2022. P. 658–668. DOI: https://doi.org/10.2991/978-94-6463-030-5_66
8. Rezeq M., Aouam T., Gailly F. Hybrid simulation-optimization approach for planning relief-aid distribution with a real-world case study. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*. 2024. Vol. 14, № 4. P. 419–444. DOI: <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-10-2023-0104>
9. Xi Y., Jia X., Zhang H. Real-time multimodal route optimization and anomaly detection for cross-border logistics using deep reinforcement learning. *Academia Nexus Journal*. 2024. Vol. 3, № 3. URL: <https://academianexusjournal.com/index.php/anj/article/view/8/9> (дата звернення: 08.03.2025).
10. Rudevskva V., Boyarko I., Shcherbyna A., Sydorenko O., Koblyk I., Ponomarova O. The impact of the banking system liquidity on the volume of lending and investment in government securities during the war. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*. 2024. Vol. 1, № 54. P. 37–50. DOI: <https://doi.org/10.55643/fcaptp.1.54.2024.4283>
11. Стороженко О. О., Настенко М. М. Проблеми бюджетного планування в системі місцевих фінансів і шляхи його вдосконалення. *Економіка і управління бізнесом*. 2023. Том 14, № 4. С. 19–32. DOI: [https://doi.org/10.31548/economics14\(4\).2023.017](https://doi.org/10.31548/economics14(4).2023.017)
12. Skliarenko K. Big Data in logistics marketing for customer churn prediction and dynamic pricing. *Актуальні питання економічних наук*. 2025. Вип. 16. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17439059>

13. Luo N., Yu H., You Z., Li Y., Zhou T., Jiao Y., Qiao S. Fuzzy logic and neural network-based risk assessment model for import and export enterprises: A review. *Journal of Data Science and Intelligent Systems*. 2023. Vol. 1, № 1. P. 2–11. DOI: <https://doi.org/10.47852/bonviewJDSIS32021078>
14. Wang J., Zheng S., Liu W., Chen L., Wen Z., Li X. Prediction, evaluation and optimization of China's copper resource supply system under carbon constraints. *Sustainable Production and Consumption*. 2023. Vol. 39. P. 285–300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.05.021>
15. Jahid M. S. R. AI-driven optimization and risk modeling in strategic economic zone development for mid-sized economies: A review approach. *International Journal of Scientific Interdisciplinary Research*. 2025. Vol. 6, № 1. P. 185–218. DOI: <https://doi.org/10.63125/31wna449>

References

- Luzhanska N. (2020) Simulation and optimization of freight customs complexes based on queueing systems. *Transport Systems and Transport Technologies*, no. 19, pp. 37–42. <https://doi.org/10.15802/tsst2020/208693>
- Hsu H.-P., Chou C.-C., Wang C.-N. (2022) Heuristic and metaheuristic-based simulation optimization approaches for integrated scheduling of yard crane, yard truck, and quay crane considering import and export containers. *IEEE Access*, vol. 10, pp. 64650–64670. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3180752>
- Bett D. K., Ali I., Gheith M., Eltawil A. (2024) Simulation-based optimization of truck appointment systems in container terminals: A dual transactions approach with improved congestion factor representation. *Logistics*, vol. 8, no. 3, Article 80. <https://doi.org/10.3390/logistics8030080>
- Popa C., Stefanov O., Goia I., Atodiresei D. (2025) Risk-based optimization of multimodal oil product operations through simulation and workflow modeling. *Logistics*, vol. 9, no. 3, Article 79. <https://doi.org/10.3390/logistics9030079>
- Zhou S., Zhang N., Duan Q., Xiao J., Yang J. (2024) Automatic scheduling method for customs inspection vehicle relocation based on automotive electronic identification and biometric recognition. *Algorithms*, vol. 17, no. 11, Article 483. <https://doi.org/10.3390/a17110483>
- Cao Q., Zheng X. (2024) Application of artificial intelligence technology in the supervision of customs clearance machine inspection. *World Customs Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 51–76. <https://doi.org/10.55596/001c.122754>
- Wu Y., Xue C., Li S. (2022) Optimization analysis of customs supervision strategy based on complex network evolutionary game. In *Proceedings of the International Conference on Big Data, Blockchain and Economy Management (ICBBEM 2022)* (pp. 658–668). Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-030-5_66
- Rezeq M., Aouam T., Gailly F. (2024) Hybrid simulation-optimization approach for planning relief-aid distribution: A real-world case study. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, vol. 14, no. 4, pp. 419–444. <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-10-2023-0104>
- Xi Y., Jia X., Zhang H. (2024) Real-time multimodal route optimization and anomaly detection for cross-border logistics using deep reinforcement learning. *Academia Nexus Journal*, vol. 3, no. 3. Retrieved from <https://academianexusjournal.com/index.php/anj/article/view/8/9>
- Rudevska V., Boyarko I., Shcherbyna A., Sydorenko O., Koblyk I., Ponomarova O. (2024) The impact of banking system liquidity on lending and investment in government securities during wartime. *Financial and Credit Activity: Problems of Theory and Practice*, vol. 1, no. 54, pp. 37–50. <https://doi.org/10.55643/fcactp.1.54.2024.4283>
- Storozhenko O. O., Nastenko M. M. (2023) Problems of budget planning in the system of local finance and ways of its improvement. *Business Economics and Management*, vol. 14, no. 4, pp. 19–32. [https://doi.org/10.31548/economics14\(4\).2023.017](https://doi.org/10.31548/economics14(4).2023.017)
- Skliarenko K. (2025) Big data in logistics marketing for customer churn prediction and dynamic pricing. *Current Issues of Economic Sciences*, no. 16. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17439059>
- Luo N., Yu H., You Z., Li Y., Zhou T., Jiao Y., Qiao S. (2023) Fuzzy logic and neural network-based risk assessment model for import and export enterprises: A review. *Journal of Data Science and Intelligent Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 2–11. <https://doi.org/10.47852/bonviewJDSIS32021078>
- Wang J., Zheng S., Liu W., Chen L., Wen Z., Li X. (2023) Prediction, evaluation and optimization of China's copper resource supply system under carbon constraints. *Sustainable Production and Consumption*, vol. 39, pp. 285–300. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.05.021>
- Jahid M. S. R. (2025) AI-driven optimization and risk modeling in strategic economic zone development for mid-sized economies: A review. *International Journal of Scientific Interdisciplinary Research*, vol. 6, no. 1, pp. 185–218. <https://doi.org/10.63125/31wna449>

Дата першого надходження рукопису до видання: 16.11.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025
 Дата публікації: 31.12.2025

В. А. КРІСІЛОВ

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інженерії програмного забезпечення
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID: 0000-0003-1092-6977

О. В. ІЩЕНКО

кандидат технічних наук,
доцент кафедри механіки, автоматизації та інформаційних технологій
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова
ORCID: 0000-0002-7882-4718

МЕТОДИ ВІЗУАЛЬНОГО, ТЕКСТОВОГО ТА ІНТЕРНЕТ-АНАЛІЗУ ДАНИХ У СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ DATA MINING

У статті розглянуто комплексний підхід до аналізу даних у сучасних системах Data Mining, який поєднує методи текстового, візуального та інтернет-орієнтованого опрацювання інформації. Показано, що різноманітність сучасних даних, які охоплюють текстові, поведінкові, структуровані та динамічні інформаційні потоки, зумовлює потребу у використанні багаторівневих аналітичних технологій, здатних одночасно працювати з різними типами представлень та моделями. Проведено огляд наукових джерел, у межах якого підкреслено тенденції розвитку моделей оброблення природної мови (зокрема глибинного навчання), інструментів візуальної аналітики та методів web mining, а також окреслено їхні переваги та обмеження у практичних застосуваннях.

У роботі обґрунтовано доцільність інтеграції трьох груп методів у єдину аналітичну платформу, що забезпечує глибоке семантичне опрацювання даних, підвищену інтерпретованість результатів і можливість роботи з високодинамічними інтернет-потоками. Для оцінювання ефективності запропонованого підходу було розроблено прототип системи, який тестували на даних інтернет-каталогу, що містили текстові відгуки користувачів, журнали поведінкової активності та структуровані атрибути товарів. Проведене експериментальне дослідження показало, що поєднання текстових та поведінкових веб-ознак забезпечує покращення якісних метрик класифікації порівняно з використанням лише текстових даних. Інтеграція візуальної аналітики, у свою чергу, суттєво зменшує час інтерпретації результатів та підвищує зручність роботи аналітиків, що підтверджено як операційними показниками, так і суб'єктивними оцінками спеціалістів.

Результати дослідження свідчать, що інтегрований підхід є перспективним для побудови масштабованих, адаптивних та інтерпретованих систем Data Mining, орієнтованих на реальні умови оброблення великих даних. Подальші напрями роботи пов'язані з розвитком універсальних моделей об'єднання текстових, поведінкових, графових та просторово-часових даних, а також удосконаленням інструментів пояснюваного штучного інтелекту для аналізу складних аналітичних процесів.

Ключові слова: Data Mining, інтелектуальний аналіз даних, текстовий аналіз, візуальна аналітика, web mining, інтернет-дані, машинне навчання, глибинне навчання, інтегровані аналітичні системи, пояснюваний штучний інтелект.

V. A. KRISILOV

Dr. Sci., Professor,
Professor at the Software Engineering Department
Odesa Polytechnic National University
ORCID: 0000-0003-1092-6977

O. V. ISHCENKO

Ph.D., Associate Professor at the Department of Mechanics, Automation
and Information Technologies
Odesa I. I. Mechnikov National University
ORCID: 0000-0002-7882-4718

METHODS OF VISUAL, TEXTUAL, AND WEB DATA ANALYSIS IN MODERN DATA MINING SYSTEMS

The article examines a comprehensive approach to data analysis in modern Data Mining systems, which integrates methods of textual, visual, and Internet-oriented information processing. It is shown that the heterogeneity of contemporary data, encompassing textual, behavioral, structured, and dynamic information streams, necessitates the use of multi-level analytical technologies capable of operating simultaneously with different types of representations and models. A review of scientific sources was conducted, highlighting the development trends of natural language processing models (including deep learning techniques), visual analytics tools, and web mining methods, as well as outlining their advantages and limitations in practical applications.

The study substantiates the feasibility of integrating these three groups of methods into a unified analytical platform that ensures deep semantic processing of data, enhanced interpretability of results, and the ability to handle highly dynamic Internet data flows. To evaluate the effectiveness of the proposed approach, a prototype system was developed and tested on an online-catalog dataset that included user textual reviews, behavioral activity logs, and structured product attributes. The experimental results demonstrate that combining textual features with behavioral web indicators improves classification performance compared to relying solely on textual data. The integration of visual analytics, in turn, significantly reduces the time required for interpreting the results and enhances user experience, which is confirmed both by operational metrics and expert evaluations.

The findings indicate that the integrated approach is promising for developing scalable, adaptive, and interpretable Data Mining systems designed for real-world big data processing conditions. Future research should focus on advancing universal models capable of combining textual, behavioral, graph-based, and spatiotemporal data, as well as improving explainable artificial intelligence tools for analyzing complex analytical processes.

Key words: *Data Mining, intelligent data analysis, text analysis, visual analytics, web mining, Internet data, machine learning, deep learning, integrated analytical systems, explainable artificial intelligence.*

Постановка проблеми

У сучасних системах інтелектуального аналізу даних зростає потреба у методах, здатних ефективно опрацювати різноманітні джерела інформації: візуальні об'єкти, текстові корпуси та інтернет-дані. Класичні алгоритми Data Mining орієнтовані переважно на структуровані набори даних і не забезпечують повноцінної підтримки гібридних форматів, що поєднують зображення, текстові фрагменти, веб-логі чи потокові дані з мережевих ресурсів. Це створює методологічний розрив між реальними потребами аналітичних застосунків та інструментальною базою, яка часто не враховує специфіку мультимодальних даних.

Проблема ускладнюється тим, що кожен тип даних має власні особливості: візуальні дані потребують семантичного виділення ознак, текстові – лінгвістичного моделювання, а інтернет-дані, в свою чергу, – врахування динамічності, нестабільності та високої варіативності джерел. Використання окремих, несумісних між собою методів аналізу призводить до втрати інформації, зниження точності моделей та ускладнення інтеграції результатів у єдину аналітичну систему.

У таких умовах виникає потреба у формуванні цілісних методів, що поєднують інструменти візуального, текстового та інтернет-аналізу в межах єдиної методологічної основи. Їх інтеграція дозволяє підвищити інформативність ознак, забезпечити оброблення неструктурованих та слабоструктурованих даних, а також адаптувати аналітичні процеси до особливостей сучасних систем Data Mining. Формування таких узгоджених методів є ключовим кроком до підвищення точності прогнозування, оптимізації процесів класифікації та покращення загальної ефективності інтелектуальних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні системи Data Mining орієнтовані на роботу з різними типами даних – текстовими, візуальними та інтернет-даними, що потребує поєднання кількох аналітичних підходів. У текстовому аналізі ключовим завданням залишається перетворення неструктурованих масивів у структуровані представлення, що забезпечується методами очищення, лінгвістичного подання та моделювання закономірностей [1, с. 26959]. Ефективність таких систем значно зростає завдяки ML- (machine learning, алгоритми машинного навчання) і DL-алгоритмам (deep learning, алгоритми глибокого навчання): зокрема, LSTM (Long Short-Term Memory, різновид рекурентних нейронних мереж) демонструє найвищу точність класифікації текстів – до 92% [2, с. 1].

У візуальному аналізі відбувається перехід до інтерактивних методів, де користувач безпосередньо впливає на результати навчання моделі. Інтерактивна візуалізація дозволяє досягати високої продуктивності навіть за малих вибірок [3, с. 3513]. Особливу увагу приділено візуальній аналітиці для глибоких мереж, оскільки такі моделі залишаються складними для інтерпретації; запропонована interrogative-рамка (спосіб аналізу глибоких моделей через систему структурованих запитань) структурує підходи до пояснення та налагодження DL-моделей [4, с. 2674]. Практичну користь підтверджують дослідження в бізнес-аналітиці, де поєднання VDM (Visual Data Mining, візуальний data mining) та EDA (Exploratory Data Analysis, розвідувальний аналіз даних) забезпечує ефективне виявлення патернів у даних інвентаризації [5, с. 1808].

Інтернет-аналіз даних представлений як класичним веб-майнінгом – методами, орієнтованими на аналіз вмісту, поведінки користувачів та структурних зв'язків [6, с. 285], так і сучасними підходами до аналізу соціальних медіа. Нові аналітичні платформи бізнес-інтелекту використовують великі масиви даних із соціальних платформ для підвищення конкурентоспроможності бізнесу в постпандемічний період [7, с. 1]. Окремий напрям становить аналіз просторово-часових даних, який досліджує закономірності динамічних процесів у просторі та часі, але стикається з проблемами інтеграції візуалізації та аналітики [8, с. 1441].

У медичних системах, що базуються на Інтернеті речей, ML застосовується для аналізу великих фізіологічних потоків даних; огляди підкреслюють важливість моделі 5V та проблеми масштабованості [9, с. 234]. У текстовому аналізі актуальним стає застосування графових нейронних мереж, які дозволяють моделювати складні зв'язки між словами та документами, забезпечуючи точнішу класифікацію [10, с. 1].

Отже, сучасні дослідження демонструють зближення текстового, візуального та веб-аналізу в єдині інтегровані системи Data Mining, орієнтовані на різномірні дані, масштабованість і підвищення інтерпретованості моделей.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розроблення узагальненої методології поєднання візуальних, текстових та інтернет-орієнтованих методів аналізу даних у сучасних системах Data Mining з урахуванням їхніх особливостей, обмежень та сфер застосування.

Для досягнення цієї мети потрібно вирішити наступні задачі:

- визначити спільні та відмінні риси між підходами до оброблення текстових, візуальних і веб-даних;
- узагальнити сучасні алгоритмічні та технологічні тенденції у відповідних підсистемах Data Mining;
- сформулювати інтегрований підхід, що забезпечує ефективну взаємодію зазначених методів у рамках єдиної аналітичної системи;
- обґрунтувати перспективні напрями розвитку систем Data Mining на основі отриманих результатів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Сучасні системи Data Mining функціонують у середовищі, де дані мають різну структуру, динаміку й семантику, тому ефективність аналітичних процесів значною мірою залежить від здатності поєднувати методи роботи з текстовими, візуальними та інтернет-даними в єдиній аналітичній моделі. Текстовий аналіз є одним із найбільш поширених напрямів, оскільки значна частина інформації представлена у вигляді документів, повідомлень, коментарів чи веб-контенту. Основними кроками тут виступають очищення, нормалізація та побудова векторних подань, після чого застосовуються алгоритми машинного та глибинного навчання. Використання архітектур LSTM чи трансформерних моделей дає змогу виявляти складні семантичні закономірності та досягати високої точності класифікаційних моделей, значно перевищуючи традиційні статистичні підходи.

Візуальний аналіз даних відіграє ключову роль там, де необхідно підвищити інтерпретованість моделей або надати користувачу можливість взаємодіяти з великими масивами інформації. Останні підходи передбачають інтерактивні механізми, за яких користувач може впливати на процес навчання, маркувати дані, уточнювати кластери чи змінювати набір ознак у режимі реального часу. Такі методи зменшують потребу у великих вибірках і дозволяють досягати стабільних результатів з обмеженим набором навчальних даних. Разом з тим, окремим напрямом стала візуальна аналітика глибинних моделей. Потреба в поясненості та прозорості роботи нейронних мереж стимулює створення інструментів, що дозволяють виявляти помилки, оцінювати важливість ознак і розуміти логіку формування прогнозів.

Інтернет-орієнтований аналіз даних охоплює широкий спектр джерел, від веб-сторінок і поведінкових логів до постів у соціальних мережах та сенсорних потоків Інтернету речей. Класичний веб-майнінг включає аналіз вмісту, структури та поведінки користувачів, забезпечуючи виявлення прихованих шаблонів, рекомендаційних сигналів і структурної організації мережі. Аналіз даних соціальних медіа, що характеризуються високою швидкістю та великим обсягом, потребує застосування Big Data-фреймворків для обробки текстів, тональності, трендів і взаємодії користувачів. Водночас розвиток Інтернету речей породжує окремий клас даних – високочастотні, різномірні сенсорні потоки, які потребують спеціальних методів обробки, включно з потоковими ML-алгоритмами та ансамблевими моделями.

Особливе місце в сучасному Data Mining посідають просторово-часові та графові методи, що дозволяють моделювати складні просторово-часові та міжоб'єктні зв'язки. Просторово-часовий аналіз широко застосовується у транспортних системах, логістиці, безпеці чи прогнозуванні подій, але залишається складним для візуалізації та автоматизації. Графові нейронні мережі дозволяють працювати з неєвклідовими структурами, такими як документи, користувачі чи гіперпосилання, що робить їх особливо ефективними у класифікації текстів та аналізі інтернет-структур. Текстовий компонент Data Mining охоплює основні методи NLP (Natural Language Processing), включаючи очищення, нормалізацію, формування лінгвістичних подань, семантичне моделювання та застосування глибинних архітектур.

На основі узагальнення розглянутих методів доцільно виділити інтегровану структуру системи Data Mining, що поєднує текстовий, візуальний та інтернет-орієнтований аналіз у єдиному аналітичному середовищі. Узагальнену модель системи наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Компоненти інтегрованої системи Data Mining

Компонент	Опис	Типи даних	Методи
Текстовий модуль	Забезпечує семантичну обробку та узагальнення інформації з текстів	Документи, повідомлення, веб-контент	NLP, embeddings, класифікація, DL-моделі
Візуальний модуль	Відповідає за інтерпретацію, пояснення та інтерактивний аналіз результатів	Числові дані, результати моделей, графічні структури	VDM, EDA, explainable DL, інтерактивні панелі
Веб-модуль	Обробляє динамічні інтернет-дані з веб-ресурсів, соцмереж та IoT	HTML-структури, логи, соціальні дані, сенсорні потоки	Web-content/usage/structure mining, big data analytics
Інтеграційний блок	Поєднує результати різних модулів у єдину аналітичну модель	Дані всіх типів	Ensemble-моделі, fusion-підходи, мета-аналітика

Таблиця демонструє, що інтегрована система складається з чотирьох взаємопов'язаних компонентів, кожен з яких виконує специфічні функції. Текстовий модуль забезпечує глибинний семантичний аналіз, візуальний модуль – інтерпретацію та пояснення результатів, а веб-модуль – роботу з динамічними потоками інтернет-даних. Інтеграційний блок синтезує отримані результати, формуючи цілісну модель, що підвищує точність, масштабованість і надійність аналітичної системи.

Для перевірки практичної доцільності запропонованого інтегрованого підходу було проведено експериментальне дослідження на прототипі системи Data Mining, призначеної для прогнозування рівня інтересу користувачів до товарів інтернет-каталогу. Вхідний набір даних включав три основні підмножини: текстові дані, що склалися з 10 000 користувацьких відгуків і пошукових запитів; інтернет-дані у вигляді журналів переглядів сторінок, кліків по товарах та операцій додавання до кошика (загалом близько 200 000 записів сесій); а також структуровані характеристики товарів, зокрема категорії, діапазони цін та базові показники попиту.

Експеримент був спрямований на порівняння ефективності трьох конфігурацій системи. У першому варіанті («Text-only») використовувався лише текстовий аналіз, який включав передобробку даних методом NLP, побудову векторних подань та подальшу класифікацію. У другому варіанті («Text + Web») до текстових ознак додавалися показники поведінки користувачів, отримані з даних про поведінку користувачів у вебсередовищі, такі як частота переглядів, глибина сесій і показники конверсій. Третій варіант («Integrated») реалізовував комплексний підхід, доповнюючи попередні модулі засобами візуальної аналітики (інтерактивними панелями, діаграмами важливості ознак та візуалізацією сегментів користувачів), що давало можливість глибше інспектувати результати та прискорювати процес прийняття рішень.

У всіх конфігураціях вирішувалося однакове завдання багатокласової класифікації рівнів попиту на товар (низький, середній або високий). Як основний алгоритм використовувався градієнтний бустинг, навчений на сукупності ознак, сформованих кожним модулем. Оцінювання точності здійснювалося за метриками Accuracy та F1-мірою (macro), а також за операційними метриками – часом навчання моделі та середнім часом, необхідним аналітику для інтерпретації результатів під час аналізу типового набору товарів. Окрім того, було враховано суб'єктивну оцінку зручності роботи з системою, яку трійка аналітиків визначила за п'ятибальною шкалою. Узагальнені результати наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння конфігурацій системи data mining

Варіант системи	Accuracy	F1-міра (macro)	Час навчання, с	Час інтерпретації (100 товарів), с	Суб'єктивна зручність (1–5)
A. Text-only	0,78	0,75	24	310	3,2
B. Text + Web	0,83	0,81	31	275	3,7
C. Integrated	0,85	0,84	36	190	4,6

Отримані результати показують, що додавання інтернет-ознак (варіант В) забезпечує помітне зростання як точності, так і F1-міри порівняно з суто текстовим підходом (варіант А), що очікувано, оскільки поведінкові сигнали доповнюють семантику тексту. Інтегрований варіант (С) демонструє лише помірне додаткове покращення за класичними метриками якості класифікації, але суттєво зменшує час інтерпретації результатів за рахунок візуальної аналітики та інтерактивної взаємодії з моделлю. Зокрема, середній час аналізу 100 позицій товарів скорочується більш ніж на 35 % порівняно з варіантом А, а суб'єктивна оцінка зручності зростає з 3,2 до 4,6.

Таким чином, експериментальні результати підтверджують, що інтегроване використання текстових, візуальних та інтернет-орієнтованих методів аналізу даних є доцільним не лише з погляду точності прогнозування, але й з позицій інтерпретованості, швидкості аналітичного циклу та зручності роботи користувача з системою.

Висновки

У роботі було здійснено комплексний аналіз методів текстового, візуального та інтернет-орієнтованого аналізу даних у контексті сучасних систем Data Mining, а також обґрунтовано необхідність їх інтегрованого використання. Огляд наукових джерел показав, що кожен із розглянутих підходів має свої сильні сторони: текстовий аналіз забезпечує глибинне семантичне опрацювання інформації, візуальні методи підвищують інтерпретованість і контрольованість моделей, а інтернет-аналіз дає змогу працювати з динамічними та високовимірними потоками даних, характерними для сучасних веб-систем.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили практичну доцільність інтегрованого підходу. Зокрема, поєднання веб-поведінкових та текстових ознак дозволило підвищити точність класифікації порівняно з моделями, що використовують лише один тип даних. Додавання візуальної аналітики не призвело до суттєвого зростання стандартних метрик точності, проте забезпечило значне скорочення часу інтерпретації результатів, підвищило зручність роботи аналітиків і зробило процес прийняття рішень більш прозорим.

Отримані результати свідчать, що майбутні системи Data Mining повинні будуватися на мультикомпонентних архітектурах, здатних об'єднувати різномірні джерела інформації та забезпечувати як високу точність, так і інтерпретованість моделей. Перспективним напрямом подальших досліджень є розроблення універсальних інтеграційних модулів, що автоматично поєднують текстові, поведінкові та графові дані, а також застосування гібридних підходів пояснюваного штучного інтелекту для підвищення прозорості складних моделей у реальних аналітичних сценаріях.

Список використаної літератури

1. Rautela R., Kumar S., Kumar A. та ін. Text mining: a comprehensive survey // *International Journal of Recent Scientific Research*. 2018. Vol. 9, Iss. 5(G). P. 26959–26962. DOI: 10.24327/IJRSR.2018.0905.2158.
2. Alqahtani A., Ghazali R., Hasan M. та ін. An efficient approach for textual data classification using deep learning // *Frontiers in Computational Neuroscience*. 2022. Vol. 16. Article 992296. DOI: 10.3389/fncom.2022.992296.
3. Li H., Ling X., Zhang B. та ін. Interactive machine learning by visualization: a small data solution // *Proc. IEEE International Conference on Big Data*. 2018. P. 3513–3521. DOI: 10.1109/BigData.2018.8621952.
4. Hohman F., Kahng M., Pienta R., Chau D.H. Visual analytics in deep learning: an interrogative survey for the next frontiers // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2019. Vol. 25, No. 8. P. 2674–2693. DOI: 10.1109/TVCG.2018.2843369.
5. Yanto I. T., Handayani O. P. Visualization of data inventory using visual data mining (VDM) and exploratory data analysis (EDA) methods // *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*. 2025. Vol. 9, No. 5. P. 1808–1815. DOI: 10.62527/joiv.9.5.4075.
6. Begam A. M., Saravanan B. V. Web mining concepts, applications and tools: a survey // *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 2019. Vol. 6, No. 5. P. 285–288.
7. Darwiesh A., Alghamdi M. I., El-Baz A. H., Elhoseny M. Social media big data analysis: towards enhancing competitiveness of firms in a post-pandemic world // *Journal of Healthcare Engineering*. 2022. Article ID 6967158. DOI: 10.1155/2022/6967158.
8. Hamdi A., Chen Y.-P., Mohamed M. B., Hmeidi I. Spatiotemporal data mining: a survey on challenges and open problems // *Artificial Intelligence Review*. 2022. Vol. 55. P. 1441–1488. DOI: 10.1007/s10462-021-09994-y.
9. Li W., Aram J., Islam M. M. та ін. A comprehensive survey on machine learning-based big data analytics for IoT-enabled smart healthcare system // *Mobile Networks and Applications*. 2021. Vol. 26, No. 1. P. 234–252. DOI: 10.1007/s11036-020-01700-6.
10. Wang K., Ding Y., Han S. C. Graph neural networks for text classification: a survey // *Artificial Intelligence Review*. 2024. Vol. 57, Article 190. DOI: 10.1007/s10462-024-10808-0.

References

1. Rautela, R., Kumar, S., Kumar, A., et al. (2018). Text mining: A comprehensive survey. *International Journal of Recent Scientific Research*, 9(5G), 26959–26962. <https://doi.org/10.24327/IJRSR.2018.0905.2158>.
2. Alqahtani, A., Ghazali, R., Hasan, M., et al. (2022). An efficient approach for textual data classification using deep learning. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 16, 992296. <https://doi.org/10.3389/fncom.2022.992296>.
3. Li, H., Ling, X., Zhang, B., et al. (2018). Interactive machine learning by visualization: A small data solution. In *2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)* (pp. 3513–3521). IEEE. <https://doi.org/10.1109/BigData.2018.8621952>.
4. Hohman, F., Kahng, M., Pienta, R., & Chau, D. H. (2019). Visual analytics in deep learning: An interrogative survey for the next frontiers. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 25(8), 2674–2693. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2843369>.

5. Yanto, I. T., & Handayani, O. P. (2025). Visualization of data inventory using visual data mining (VDM) and exploratory data analysis (EDA) methods. *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*, 9(5), 1808–1815. <https://doi.org/10.62527/joiv.9.5.4075>.
6. Begam, A. M., & Saravanan, B. V. (2019). Web mining concepts, applications and tools: A survey. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 6(5), 285–288.
7. Darwiesh, A., Alghamdi, M. I., El-Baz, A. H., & Elhoseny, M. (2022). Social media big data analysis: Towards enhancing competitiveness of firms in a post-pandemic world. *Journal of Healthcare Engineering*, 2022, 6967158. <https://doi.org/10.1155/2022/6967158>.
8. Hamdi, A., Chen, Y.-P., Mohamed, M. B., & Hmeidi, I. (2022). Spatiotemporal data mining: A survey on challenges and open problems. *Artificial Intelligence Review*, 55, 1441–1488. <https://doi.org/10.1007/s10462-021-09994-y>.
9. Li, W., Aram, J., Islam, M. M., et al. (2021). A comprehensive survey on machine learning-based big data analytics for IoT-enabled smart healthcare system. *Mobile Networks and Applications*, 26(1), 234–252. <https://doi.org/10.1007/s11036-020-01700-6>.
10. Wang, K., Ding, Y., & Han, S. C. (2024). Graph neural networks for text classification: A survey. *Artificial Intelligence Review*, 57(8), 190. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10808-0>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 30.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 29.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

B. O. KUZIKOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Computer Science
Sumy State University
ORCID: 0000-0002-9511-5665

O. V. VLASENKO

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Assistant at the Department of Computer Science
Sumy State University
ORCID: 0000-0003-4315-5654

O. V. SHUTYLIEVA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Assistant at the Department of Computer
Science Sumy State University
ORCID: 0000-0002-7236-8555

O. A. SHOVKOPLYAS

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Computer
Science Sumy State University
ORCID: 0000-0002-4596-2524

S. R. SHOVKOPLIAS

Postgraduate Student at the Department of Computer Science
Sumy State University
ORCID: 0000-0003-1837-0213

P. O. TYTOV

Postgraduate Student at the Department of Computer Science
Sumy State University
ORCID: 0009-0003-6911-5463

MULTI-MODEL APPROACH TO SYNTHETIC DATA GENERATION FOR SEMANTIC SIMILARITY ASSESSMENT OF WEB INTERFACE TEXT LABELS

*Automating web accessibility verification against WCAG standards remains a significant challenge, particularly for criteria requiring semantic understanding of content. WCAG Success Criterion 2.5.3 requires consistency between the visible text of interface elements and their accessible names; however, traditional string matching methods fail to account for semantic nuances of textual modifications. **Objective.** To develop a methodology for creating and validating a robust dataset for assessing semantic correspondence of text labels in the absence of an objective ground truth. This includes developing a taxonomy of semantic transformations, applying a multi-model approach to generation and annotation of synthetic data in Ukrainian and English languages. **Methods.** The study employs a multi-model approach involving four leading LLMs to generate over 14 thousand unique text pairs and 17 models for data annotation. A taxonomy of semantic transformations was developed that classifies modification types from permissible contextual extensions to critical contradictions. For validation, a statistical framework for consensus formation based on the median scores of a reference core of models was applied, utilizing ICC2k metrics, coefficients of determination, and Spearman correlation. **Results.** A validated dataset was created with synthetic data annotated on a semantic similarity scale from -1 to 1. The multi-model approach ensured dataset diversity and minimized biases of individual models. **Conclusions.** The developed methodology effectively addresses the problem of creating training data without an objective ground truth. The formed dataset enables objective comparison of commercial LLMs and cost-effective knowledge distillation into small models for practical application in automated accessibility testing tools.*

Key words: large language models, web accessibility, multi-model approach, semantic similarity, statistical consensus, synthetic training data, dataset validation.

Б. О. КУЗІКОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних наук
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0002-9511-5665

О. В. ВЛАСЕНКО

кандидат фізико-математичних наук,
асистент кафедри комп'ютерних наук
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0003-4315-5654

О. В. ШУТИЛЄВА

кандидат фізико-математичних наук,
асистент кафедри комп'ютерних наук
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0002-7236-8555

О. А. ШОВКОПЛЯС

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
завідувач кафедри комп'ютерних наук
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0002-4596-2524

С. Р. ШОВКОПЛЯС

аспірант кафедри комп'ютерних наук
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0003-1837-0213

П. О. ТИТОВ

аспірант кафедри комп'ютерних наук
Сумський державний університет
ORCID: 0009-0003-6911-5463

МУЛЬТИМОДЕЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ГЕНЕРАЦІЇ СИНТЕТИЧНИХ ДАНИХ ДЛЯ ОЦІНКИ СЕМАНТИЧНОЇ СХОЖОСТІ ТЕКСТОВИХ МІТОК ВЕБІНТЕРФЕЙСІВ

Автоматизація перевірки веб-доступності за стандартами *Web Content Accessibility Guidelines (WCAG)* залишається значним викликом, особливо для критеріїв, що вимагають семантичного розуміння контенту. Критерій *WCAG 2.5.3 «Мітка у імені»* вимагає узгодженості між видимим текстом елементів інтерфейсу та їхніми доступними іменами, проте традиційні методи зіставлення рядків не враховують семантичні нюанси текстових модифікацій. **Мета.** Розробити методологію створення та валідації надійного набору даних для оцінки семантичної відповідності текстових міток за відсутності об'єктивного еталону. Це включає розробку таксономії семантичних змін, застосування мультимодельного підходу до генерації та анотації синтетичних даних українською та англійською мовами. **Методи.** Дослідження використовує мультимодельний підхід із залученням чотирьох провідних LLM для генерації понад 14 тисяч унікальних пар текстів та 17 моделей для анотування даних. Розроблено таксономію семантичних змін, що класифікує типи модифікацій від допустимих розширень контексту до критичних суперечностей. Для валідації застосовано статистичний фреймворк формування консенсусу на основі медіани оцінок еталонного ядра моделей із використанням метрик *ICCS2k*, коефіцієнтів детермінації та кореляції Спірмена. **Результати.** Створено валідований датасет, синтетичні дані анотовані за шкалою семантичної схожості від -1 до 1. Мультимодельний підхід забезпечив різноманітність датасету та мінімізував упередження окремих моделей. **Висновки.** Розроблена методологія ефективно вирішує проблему створення навчальних даних за відсутності еталону. Сформований датасет уможливує об'єктивне порівняння комерційних LLM та економічно ефективною дистиляцію знань у малі моделі для практичного застосування в інструментах автоматизованого тестування доступності.

Ключові слова: великі мовні моделі, доступність вебсайтів, мультимодельний підхід, семантична схожість, статистичний консенсус, синтетичні навчальні дані, валідація наборів даних.

Introduction

Website accessibility ensures equitable information and service access for all users, particularly individuals with disabilities, by accommodating diverse impairments affecting vision, hearing, speech, cognitive function, and motor abilities. The Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) establish accessibility standards that websites must meet.

Automating WCAG compliance verification presents considerable challenges. Contemporary tools can automatically assess only a limited subset of criteria [1], focusing predominantly on technical accessibility aspects. However, criteria demanding semantic content comprehension remain resistant to automation [2]. WCAG Success Criterion 2.5.3 (Label in Name) mandates that the visible text of an interface element must be contained within its accessible name, ensuring alignment between what users perceive visually and what assistive technologies interpret [3]. Current automated accessibility testing tools rely primarily on rudimentary string-matching algorithms, such as substring inclusion or Levenshtein distance. These approaches fail to capture semantic nuances in textual modifications: they may flag legitimate contextual additions ("Process" → "Process payment") as violations while simultaneously overlooking critical semantic alterations ("Save" → "Seve and delete").

Large language models (LLMs) demonstrate capability in accounting for semantic relationships and contextual understanding [4-6]. Nevertheless, their application to training data generation encounters a fundamental challenge: the absence of objective ground truth. Reliance on a single LLM carries the risk of inheriting its systematic biases.

The objective of this work is to develop a methodology for creating and validating a robust dataset for assessing semantic correspondence of text labels according to WCAG Success Criterion 2.5.3 in the absence of an objective ground truth. This encompasses: (1) development of a taxonomy of semantic transformations to systematize relationships between texts, (2) application of a multi-model approach to synthetic data generation to avoid biases of individual models, and (3) creation of a statistical framework for forming consensus-based scores as "proxy ground truth" based on aggregation of results from multiple LLMs.

Dataset Creation and Validation

To systematize differences between visible text and its ARIA description, a taxonomy was developed that classifies various types of semantic modifications and their potential impact on accessibility. The taxonomy serves as a fundamental foundation for subsequent synthetic dataset generation, as it enables purposeful creation of examples covering the entire spectrum of possible semantic relationships between texts.

Categories are ordered by increasing potential risk—from permissible modifications that enhance accessibility to potentially hazardous changes that may mislead users. The developed taxonomy is presented in Table 1.

Table 1

Taxonomy of Semantic Transformations

Category	Subcategory	Visible Text	ARIA-label	Criticality
Contextual Extension	Addition of Clarification	Download	Download user manual	Low
	Addition of System Information	Download	Download (Ctrl+D)	Low
Action Object Modification	Direct Object Modification	Process payment	Process order	Medium
	Object Addition	Download	Download and delete file	Medium
Action Type Modification	Addition of Opposite Action	Save	Save and delete	High
	Complete Action Change	Download	Cancel download	High
Negation	Direct Negation	Download	Do not download	Critical
	Contextual Negation	Download	Disable download function	Critical
Technical Modifications	Formatting	Download file	DOWNLOAD FILE	Low
	Abbreviations	Download frequently asked questions	Download (FAQ)	Low

This classification provides a structured approach to test data generation covering all relevant scenarios from safe contextual extensions to critical semantic contradictions.

Multi-Model Synthetic Data Generation

To avoid biases of individual models and ensure maximum data diversity, synthetic dataset generation was conducted using four leading commercial LLMs: Anthropic Claude Sonnet (versions 3.5 and 3.7), OpenAI ChatGPT 4o, Google Gemini (2.0 Experimental Advanced, 2.5 Pro Experimental), and Grok 3.

When formulating queries to the models, two key requirements were established reflecting the specificity of WCAG Success Criterion 2.5.3:

1. The visible text must be part of the alternative text.
2. The alternative text should preferably lead with the visible text.

The prompt for data generation was structured as follows:

I need you to generate examples of web accessibility text alternatives that follow a specific pattern of {EXPLANATIONS}
Requirements:

Generate 100 examples in {LANGUAGE}
Each example should have:
Visible text: short, clear action or label. Mostly, more than one word.
Alternative text: expanded version that {EXPLANATIONS}

Format: "visible_text[TAB]alternative_text"
The visible text MUST be included within the alternative text

Preferably place the visible text at the beginning of the alternative text.
Examples should be **realistic** and represent common web interface elements - label for input field OR button.

Example format:
Submit[TAB]Submit registration form
Send[TAB]Send message to support team
Download[TAB]Download user manual in PDF format
The examples should focus on clarification additions, NOT technical/system information.
For instance:

Good: "Delete[TAB>Delete selected items permanently"
Not: "Delete[TAB>Delete (Ctrl+D)"

The examples should represent realistic web interface scenarios like:

Form actions
Navigation elements
Content interactions
User account operations
Media controls
Document operations
Communication features

Please generate 100 such examples, each on a new line, maintaining consistent formatting and ensuring real-world applicability.

The {EXPLANATIONS} parameter was substituted with the description of the corresponding category from the taxonomy (Table 1), while {LANGUAGE} was replaced with "English" or "Ukrainian" to create English-language and Ukrainian-language datasets respectively.

The total volume of generated data comprised over 14,384 unique text pairs:

- ChatGPT 4o: 3 429 samples;
- Claude Sonnet (3.5/3.7): 4 004 samples;
- Google Gemini (2.0/2.5): 4 470 samples;
- Grok 3: 2 481 samples.

Each taxonomy category was represented by 200–400 examples from each model. The utilization of multiple models not only increased data volume but also ensured diversity of stylistic and lexical characteristics. For instance, only ChatGPT employed emoji symbols in generated responses, demonstrating unique characteristics of each model and confirming the validity of the multi-model approach.

LLM-Based Annotation of Generated Data

Following the generation of synthetic text pairs, the critical task of their annotation arose—assigning each pair a numerical semantic similarity score. Since the scale of data (over 14 000 pairs) renders manual annotation unrealistic, and reliance on a single LLM carries the risk of inheriting its biases, a multi-model annotation approach with subsequent statistical score consensus was applied.

For semantic similarity assessment, a specialized prompt was developed that instructs models to evaluate pairs on a scale from -1.0 to 1.0, where -1.0 represents opposite or contradictory meaning and 1.0 represents perfect semantic correspondence. Few-shot prompting technique was employed in prompt development – providing the model with several examples of input data together with the expected output format directly in the query text. This approach enables the model to better comprehend task specificity without additional training. The data annotation prompt is presented below.

You are a semantic similarity analyzer for web accessibility. Analyze the semantic similarity between visible text and ARIA labels according to these rules:

****Similarity Scale**:**

- 1.0: Perfect semantic match (identical meaning)
- 0.8 to 0.95: Context extension without meaning change
- 0 for completely unrelated text
- 0.4 to 0.7: Object or scope variation, core action preserved
- 0.2 to 0.4: Different but related actions
- 1.0 to -0.2: Opposite or contradictory meaning

****Core Rules**:**

1. Symmetrical comparison (order doesn't matter)
2. Identical texts always get 1.0
3. Direct opposites always get -1.0
4. Unrelated texts always get 0
5. Technical annotations have minimal impact on score
6. Do not add numbering.
7. Just answer, ****no explanation****.
8. Do not ask question, always process all input.

Input Format:

The input is provided as two texts separated by a tab character:
<text1>[TAB]<text2>

Output Format:

<text1>[TAB]<text2>[TAB]<similarity_score>

****Examples**:**

Input: Submit[TAB]Submit form

Output:

Submit[TAB]Submit form[TAB]0.85,

Input: Submit[TAB]Do not submit

Output:

Submit[TAB]Do not submit[TAB]-1.0

****Compare the following pair**:**

To conserve computational resources and reduce costs, input pairs were batched in groups of 100 samples per query. Such batch processing imposes greater demands on model resilience and contextual analysis to information overload, which may adversely affect the quality of weaker models. A temperature of 0.1 was used to ensure maximum response determinism. During processing, all available scores were considered, even when a model returned partial results.

Statistical Framework for Consensus Formation

Quality assessment of large dataset annotation traditionally requires substantial human effort. To address this challenge, the LLM-as-a-Judge approach [7] was applied, wherein large language models serve as automated evaluators. In this study, 17 different LLMs were engaged to annotate each text pair. Given the absence of an objective "correct" value (ground truth), model reliability was assessed relative to a consensus score formed by a "core" of the most reliable models.

Key Framework Principles:

1. A set of reference models is determined (e.g., the most powerful LLMs with proven quality). The consensus score for each sample is obtained by taking the median of core scores. The median was selected due to its robustness to outliers and systematic shifts.

2. For each model, deviation metrics from consensus are computed (systematic model biases), including deviation variance (characterizing model "noisiness") and coefficient of determination R^2 (indicating concordance with the reference core).

3. An approach is employed that balances consensus quality and computational costs, enabling formation of a minimal model core while maintaining high reliability.

A detailed mathematical description of the framework, including formal metric definitions, theoretical properties (median robustness, ICC monotonicity), and optimization algorithms is presented in the accompanying publication [8]. Application of these metrics enables objective model comparison even no objective ground truth is available, focusing on their internal consistency. The formed consensus serves as "proxy ground truth" for annotation of the generated dataset and subsequent training of small language models.

Conclusions

The developed methodology for dataset creation and validation for semantic similarity assessment of text labels demonstrates the effectiveness of a multi-model approach under conditions of objective ground truth absence.

The developed taxonomy of semantic transformations (Table 1) provided a systematic approach to synthetic data generation, encompassing the entire spectrum of possible relationships between visible text and ARIA description—from safe contextual extensions to critical semantic contradictions. Using a semantic similarity scale ranging from -1 to 1 proved effective for nuanced assessment, enabling both quantification of semantic proximity and detection of contradictory meanings. This proves essential for identifying potentially hazardous inconsistencies, which may indicate Accessibility Cloaking Attacks[9].

The employment of four different LLMs for data generation ensured high dataset diversity. As demonstrated (e.g., emoji usage only by ChatGPT), each model possesses unique stylistic characteristics. This confirms that reliance on a single model would lead to systematic bias in the data. Generated dataset with annotation is placed at [10]. Similarly, 17 different models were engaged for data annotation, from which a compact evaluator core was formed, enabling robust consensus formation through aggregation of multiple "opinions" and avoidance of individual model bias influence.

The LLM-as-a-judge approach with consensus formation based on median scores of the reference model core proved effective for creating "proxy ground truth". Detailed statistical analysis of concordance among leading LLMs (including ICC2k computation, analysis of determination coefficients R^2 and Spearman correlation) is presented in. A central finding is that despite differences in underlying architecture and training procedures, leading models demonstrate similar semantic understanding patterns, enabling reliable consensus formation. A key finding is the distinction between formal operability (syntactic correctness of responses) and semantic assessment quality, which do not necessarily correlate. For instance, certain models demonstrated a high percentage of successful response generation but low concordance with consensus, and vice versa (see Table 2 in for details). This underscores the necessity of a statistical validation approach rather than simple counting of successful responses.

The created and validated dataset constitutes a key asset enabling both objective comparison of expensive commercial LLMs and cost-effective distillation of their knowledge into small, fast models for practical application in automated web accessibility testing tools. [11]

Bibliography

1. Automated WCAG Testing Is Not Enough for Web Accessibility & ADA Compliance. UsableNet. URL: <https://blog.usablenet.com/automated-wcag-testing-is-not-enough-for-web-accessibility-ada-compliance> (date of access: Nov. 12, 2025).
2. Sane P. A Brief Survey of Current Software Engineering Practices in Continuous Integration and Automated Accessibility Testing, *2021 Sixth International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, Chennai, India, 2021, pp. 130-134. DOI: <https://doi.org/10.1109/WiSPNET51692.2021.9419464>
3. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1. URL: <https://www.w3.org/TR/WCAG21/>. (date of access: Nov. 12, 2025).
4. Huq S.F., Tafreshipour M., Kalcevich K., Malek S. Automated Generation of Accessibility Test Reports from Recorded User Transcripts, *2025 IEEE/ACM 47th International Conference on Software Engineering (ICSE)*, Ottawa, ON, Canada, 2025, pp. 204-216. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSE55347.2025.00043>.
5. Delnevo G., Andruccioli M., Mirri S. On the Interaction with Large Language Models for Web Accessibility: Implications and Challenges, *2024 IEEE 21st Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, USA, 2024, pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCNC51664.2024.10454680>.
6. Aralimatti R., Shakhadri S.A.G., Kr K, Angadi K. Fine-Tuning Small Language Models for Domain-Specific AI: An Edge AI Perspective, *Preprints*, Feb. 2025. URL: <https://doi.org/10.20944/preprints202502.2128.v1> (date of access Nov. 12, 2025).
7. Gu J., Jiang X., Shi Z., Tan H., Zhai X., Xu C., Li W., Shen Y., Ma S., Liu H., Wang S., Zhang K., Wang Y., Gao W., Ni L., Guo, J. A survey on LLM-as-a-Judge. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.15594> (date of access Nov. 12, 2025).
8. Kuzikov B., Shovkoplias O., Tytov P., Shovkoplias S., Shutylieva O., Vlasenko O. A Statistical Framework for Consensus-Based Reliability Assessment in Large Language Model Evaluation Applied to Web Accessibility, *5th International Conference on Machine Learning and Big Data Analytics (ICMLBDA) 2025*. ICS Global, November 7-8, 2025. <https://doi.org/DOI: 10.21203/rs.3.rs-8093408/v1>

9. Kuzikov B., Tytov P., Shovkopliias O., Lavryk T., Koval V., Kuzikova S., Detection And Prevention Of Accessibility Cloaking Attacks, *Information Technology Computer Science Software Engineering and Cyber Security*, № 1, p. 124–135. DOI: <https://doi.org/10.32782/it/2025-1-17>

10. Tytov P.O. Semantic Language Models for WCAG. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/tytovpavel/semantic-language-models-for-wcag>. (date of access Nov. 12, 2025)

11. Kuzikov B.O., Shovkopliias O.A., Tytov P.O., Shovkopliias S.R. Application of small language models for semantic analysis of web interface accessibility, *Проблеми програмування*, №. 2, С. 77–86, 2025. <https://doi.org/10.15407/pp2025.02.077>

References

1. UsableNet. (n.d.). *Automated WCAG testing is not enough for web accessibility & ADA compliance*. <https://blog.usablenet.com/automated-wcag-testing-is-not-enough-for-web-accessibility-ada-compliance>

2. Sane, P. (2021). A brief survey of current software engineering practices in continuous integration and automated accessibility testing. In *2021 Sixth International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)* (pp. 130–134). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WiSPNET51692.2021.9419464>

3. World Wide Web Consortium. (2025). *Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1*. <https://www.w3.org/TR/WCAG21/>

4. Huq, S. F., Tafreshipour, M., Kalcevich, K., & Malek, S. (2025). Automated Generation of Accessibility Test Reports from Recorded User Transcripts. In *2025 IEEE/ACM 47th International Conference on Software Engineering (ICSE)* (pp. 204–216). <https://doi.org/10.1109/icse55347.2025.00043>

5. Delnevo, G., Andruccioli, M., & Mirri, S. (2024). On the Interaction with Large Language Models for Web Accessibility: Implications and Challenges. In *2024 IEEE 21st Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ccnc51664.2024.10454680>

6. Aralimatti, R., Shakhadri, S. A. G., KR, K., & Angadi, K. (2025). Fine-Tuning Small Language Models for Domain-Specific AI: An Edge AI Perspective. MDPI AG. <https://doi.org/10.20944/preprints202502.2128.v1>

7. Gu, J., Jiang, X., Shi, Z., Tan, H., Zhai, X., Xu, C., Li, W., Shen, Y., Ma, S., Liu, H., Wang, S., Zhang, K., Wang, Y., Gao, W., Ni, L., & Guo, J. (2024). A Survey on LLM-as-a-Judge (Version 6). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2411.15594>

8. Kuzikov, B., Shovkopliias, O., Tytov, P., Shovkopliias, S., Shutylieva, O., & Vlasenko, O. (2025). A statistical framework for consensus-based reliability assessment in large language model evaluation applied to web accessibility. In *5th International Conference on Machine Learning and Big Data Analytics (ICMLBDA) 2025*. ICS Global. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-8093408/v1>

9. Kuzikov, B., Tytov, P., Shovkopliias, O., Lavryk, T., Koval, V., & Kuzikova, S. (2025). Detection and prevention of accessibility cloaking attacks. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 124–135. <https://doi.org/10.32782/it/2025-1-17>

10. Tytov, P. O. (2025). *Semantic language models for WCAG* [Dataset]. Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/tytovpavel/semantic-language-models-for-wcag>

11. Kuzikov, B. O., Shovkopliias, O. A., Tytov, P. O., & Shovkopliias, S. R. (2025). Application of small language models for semantic analysis of web interface accessibility. *Problems in Programming*, 2, 77–86. <https://doi.org/10.15407/pp2025.02.077>

Дата першого надходження рукопису до видання: 16.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

Ю. В. МАКСИМ'ЮК

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри будівельної механіки
Київський національний університет будівництва і архітектури
ORCID: 0000-0002-5814-6227

К. В. ДМИТРІЄВ

аспірант кафедри будівельної механіки
Київський національний університет будівництва і архітектури
ORCID: 0009-0004-0617-4017

М. М. ЧЕРНЕНКО

аспірант кафедри будівельної механіки
Київський національний університет будівництва і архітектури
ORCID: 0009-0003-9465-459X

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЧИМИ ПРОЦЕСАМИ В УКРАЇНСЬКІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

У статті досліджено сутність і роль цифрових двійників в управлінні виробничими процесами та узагальнено їхнє значення для поліпшення управління в промисловості України. На основі аналізу сучасних наукових підходів створено чіткий контур «дані – моделі – рішення», де цифровий двійник є каналом для перетворення поточкових даних виробництва у формальні оцінки стану, прогнози та дії. Запропоновано багатошарову структуру, яка поєднує інфраструктуру промислового інтернету речей із рівнями моделей (фізично-орієнтованих, дано-орієнтованих і гібридних) та сервісами підтримки рішень, інтегрованими з MES/SCADA/APS. Показано механізми замикання контуру «план – факт» у диспетчеризації, локалізації рішень на рівні вузлів і діляниць, ураховано енергетичну складову в розклади та технологічні режими. Сформовано вимоги до ідентифікаторів, подій, атрибутів та політик доступу як умова для трасування управлінських дій. Дані досліджень і виробничі кейси демонструють, що застосування цифрових двійників зменшує простоту обладнання та діляниць, стабілізує такт ліній і операцій, знижує споживання електроенергії та інших енергоресурсів, скорочує переробки й брак, підвищує точність виконання виробничого плану. У сукупності це дає змогу посилити операційний контроль і зменшити собівартість одиниці продукції. Новизна роботи полягає в акцентуванні на ефективності управління, уніфікації термінів і ролей двійника в контексті керування й уточненні зв'язку виходів моделей із KPI підприємства. Охарактеризовано обмеження впровадження цифрових двійників, зокрема неоднорідність спадкової інфраструктури, нестачу стандартних інтерфейсів, невизначеність у змішаному моделюванні ризиків кібербезпеки. Запропоновано подальші напрями дослідження та використання цифрових двійників: профілювання архітектури під типові виробничі сценарії, методики атрибуції ефектів до управлінських рішень, керування невизначеністю моделей, інтеграцію енергетичних двійників у розклади та галузеві пілоти для масштабування.

Ключові слова: цифровий двійник, управління виробничими процесами, Індустрія 4.0, прогнозне керування, українська промисловість.

YU. V. MAKSYMIOUK

Doctor of Science (Engineering), Professor,
Professor at the Department of Structural Mechanics
Kyiv National University of Construction and Architecture
ORCID: 0000-0002-5814-6227

K. V. DMYTRIEV

Postgraduate Student at the Department of Structural Mechanics
Kyiv National University of Construction and Architecture
ORCID: 0009-0004-0617-4017

M. M. CHERNENKO

Postgraduate Student at the Department of Structural Mechanics
Kyiv National University of Construction and Architecture
ORCID: 0009-0003-9465-459X

USING DIGITAL TWINS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF PRODUCTION PROCESS MANAGEMENT IN UKRAINIAN INDUSTRY

The article examines the essence and role of digital twins in managing production processes and synthesizes their significance for improving management in the Ukrainian industry. Based on an analysis of contemporary scholarly approaches, it establishes a precise «data – models – decisions» loop, in which the digital twin is viewed as a channel for converting streaming production data into formal state estimates, forecasts, and control actions. A multilayer architecture is proposed that combines Industrial Internet of Things (IIoT) infrastructure with tiers of models (physics-based, data-driven, and hybrid) and decision-support services integrated with MES/SCADA/APS. Mechanisms are demonstrated for closing the «plan – actual» loop in dispatching, localizing decisions at the machine and work-cell levels, and embedding energy constraints into schedules and operating regimes. Requirements are formulated for identifiers, events, attributes, and access policies to support tracing managerial actions. Research data and industrial case studies show that applying digital twins reduces equipment and cell downtime, stabilizes line and operation cycle time, lowers electricity and other energy consumption, decreases rework and scrap, and improves adherence to the production plan; taken together, these effects strengthen operational control and reduce unit cost. The novelty lies in the focus on management efficiency, the harmonization of terminology and twin roles in the control context, and the clarification of links between model outputs and enterprise KPIs. The limitations of implementing digital twins include heterogeneous legacy infrastructure, a lack of standard interfaces, uncertainty in hybrid modeling, and cybersecurity risks. The paper proposes further directions for research and deployment: profiling the architecture for typical production scenarios; methods for attributing effects to managerial decisions; managing model uncertainty; integrating energy twins into scheduling; and sectoral pilots for scaling.

Key words: digital twin, production process management, Industry 4.0, predictive management, Ukrainian industry.

Постановка проблеми

Сучасні системи управління виробничими процесами потребують узгодженого інформаційного контуру «дані – моделі – рішення», однак у науковій і нормативній площинах простежуються розбіжності, оскільки дефініції цифрового двійника часто сплутують зі спорідненими концептами, застосування стандартів нерідко подають фрагментарно, а вплив двійника описують переважно через технологічні індикатори (ОЕЕ, простота, якість), а не через логіку саме управлінської ефективності. Для українського промислового контексту ці аспекти ускладнюють теоретичне обґрунтування ролі цифрових двійників у підвищенні керованості виробничих процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Орієнтуючись на сучасні енергетичні та ресурсні обмеження, цифрові двійники у фаховій літературі розглядають як науково обґрунтований механізм узгодження даних, моделей та управлінських дій у виробництві.

Початково узагальнені уявлення про зміст та управлінську доцільність двійників систематизовано в працях S. Attaran, M. Attaran, B. G. Celik, де через призму виробничих індикаторів окреслено відмежування цього підходу від традиційних моделей і його зв'язок з операційними рішеннями [1]. Концептуальний каркас «дані – модель – застосування», запропонований I. Onaji, D. Tiwari, P. Soulatiantork, B. Song, A. Tiwari, демонструє, як поєднуються рівні спостереження, моделювання та керування для підтримки рішень на лінії та в цеху [2]. У нормативному вимірі місце двійника в системі термінів, ролей та інтерфейсів формалізує International Organization for Standardization у межах ISO 23247-1, що задає узгоджені поняття й вимоги до сумісності [3]. На операційному рівні роль двійника в плануванні та диспетчеризації пояснюють висновки M. Macchi, L. Ragazzini, E. Negri, де контур «план – факт» збігається з моделлю пропускнуої здатності та станів обладнання [4]. З енергетичної перспективи вплив на керованість процесу конкретизують результати A. Billey, T. Wuest, які показують, як енергетичні двійники координують режими роботи з профілями навантаження і витрат [5].

У сфері гарантоздатної інженерії підходи до побудови двійників для промислового середовища з підвищеними ОТ-запитами систематизують В. Р. Щеглов, О. І. Морозова, окреслюючи архітектурні рішення та вимоги до надійності [6]. У застосуванні на рівні вузла можливість локальної стабілізації параметрів і замикання контуру керування ілюструє концепція інтелектуального шпинделя, викладена С. П. Сапоном [7]. У праці М. В. Філіппової, М. О. Демченко, О. В. Філіппова, С. В. Заєця обґрунтовано, як цифровий двійник для складального виробництва формалізує дані виробу й процесу та синхронізується з операціями, підсилюючи планування і виявлення помилок. Проте фокус дослідження на проектно-конструкторському рівні без зв'язку з управлінськими показниками та ієрархією рівнів створює теоретичну прогалину [8]. Кількісні підходи до перевірки впливу двійника на керованість процесу описують К. Бровко, П. Буданов, О. Великогорський, Н. Винокурова, які унаочнюють відношення між моделлю та якістю управлінських рішень у полі [9]. Додаткову аргументацію архітектурних

принципів ієрархії «дані – модель – керування» дає побудова двійника процесу лиття на виробничих даних, показана V. S. Doroshenko, V. P. Kravchenko, O. V. Tokova [10]. У ширшому промисловому контексті інтеграцію моделей із просторовими представленнями та сценаріями відновлення інфраструктури презентують В. Титаренко, С. Костецька, К. Бабік, А. Дворнік, П. Юрко [11]. З економічно-управлінського боку вплив двійників на організаційні параметри ефективності у вітчизняних галузях узагальнюють Л. В. Мазник, К. В. Жуковська [12]. Нарешті, покрокове теоретичне оформлення моделі для процесу складання та її метричну верифікацію подає О. В. Філіппов, що замикає логіку переходу від дефініції та архітектури до управлінського обґрунтування [13].

Підсумовуючи огляд, виокремимо три головні невирішені аспекти загальної проблеми. По-перше, не уніфіковано дефініційний апарат цифрових двійників і чітко не визначено їхнє місце в системі стандартів управління виробничими процесами. По-друге, відсутня цілісна теоретична схема архітектури «дані – моделі – рішення» з узгодженими рівнями керування та прозорим механізмом підтримки управлінських рішень. По-третє, досі немає достатнього синтезу наукових результатів щодо впливу цифрових двійників саме на ефективність управління в умовах української промисловості. Вказані питання є фокусом вивчення цієї статті.

Формулювання мети дослідження

Мета статті – охарактеризувати сутність і місце цифрових двійників у системі керування виробничими процесами та, спираючись на сучасні наукові підходи, узагальнити їхню роль у підвищенні ефективності управління в українській промисловості.

Завдання дослідження: розкрити зміст цифрового двійника у виробництві, відмежувати його від споріднених понять і визначити місце в Індустрії 4.0 та релевантних стандартах; підсумувати теоретичну архітектуру цифрового двійника («дані – моделі – рівні управління») та пояснити її значення для підтримки управлінських рішень.

Викладення основного матеріалу дослідження

Сучасні вимоги до підвищення ефективності управління потребують узгодженого перетворення потоків даних на керувальні дії через формальні моделі стану обладнання, процесів і ресурсних обмежень. У цьому контексті цифровий двійник є синхронізованим поданням виробничої системи, що безперервно відображає фактичний стан і генерує керувальні підказки, а промисловий інтернет речей забезпечує надійний збір телеметрії та двосторонній обмін у режимі, близькому до реального часу [1, с. 1], переводячи керування від реактивної ліквідації відхилень до превентивного вирівнювання такту й стабілізації пропускну здатності. Сутність цифрового двійника розкривається через трансформацію «дані – модель – рішення»: на рівні даних формується контекстно збагачений опис діяльності; на рівні моделей – конструктивні й поведінкові представлення для моніторингу, оцінювання, діагностики та прогнозування; на рівні рішень – алгоритми вибору дій, перепланування й локальної адаптації. Інтеграція продуктового та процесного вимірів узгоджує параметри виробу, маршрути та завантаження в єдиному цифровому поданні, зменшуючи розрив між конструкторськими припущеннями та фактичними можливостями цеху [2, с. 5–6]. Практична придатність визначається інтеграцією двійника в контури планування й диспетчеризації та аналізується за трьома питаннями: що саме виконує (від описових до діагностичних, прогностичних і приписових функцій), де інтегрований (рівні автоматизації, підсистеми обміну) і як реалізований (оцінювання, виявлення вузьких місць, прогнозне перепланування, ініціювання впливів для замикання контуру «план – факт» у реальному часі), що ставить його в центр короткогоризонтних дій і з'єднує мікрорішення робочих центрів з обмеженнями дільниці та підприємства [4, с. 5663]. Для заводів із різним обладнанням, змінюваною номенклатурою та енергетичними лімітами основним є перетворювати відхилення на дії в допустимі терміни. Саме ці завдання і розв'язує цифровий двійник, пов'язуючи виробничі показники з джерелами подій, перетворюючи готовність, стабільність циклу та частку переробки на об'єкти прогнозування й оптимізації під час роботи. Через таку інтеграцію усувається типова невизначеність на межі ІТ та ОТ, а управлінські рішення отримують одну базу погодження. Модель не лише відтворює процес, а й вказує на шляхи зменшення витрат часу й ресурсів за наявних обмежень.

Упровадження цифрових двійників у систему управління виробництвом можна розглядати як контрольований метод зміни даних на дії, де інфраструктура збору й обміну забезпечує своєчасність і повноту сигналів, зокрема подій стану обладнання, параметрів, показників якості, логістичних подій та використання енергії. Формальні моделі відтворюють поведінку дільниць та характеризують альтернативи дій із позицій мінімізації часу, перенакладень і енергоспоживання за наявних обмежень. Інтегровані механізми управління перетворюють ці оцінки на конкретні управлінські рішення: перепланування черги замовлень, зміну режимів і параметрів, перерозподіл ресурсів між вузлами, запуск резервного обладнання чи ініціювання ТО. Для української промисловості це означає посилення оперативної перевірки на коротких горизонтах завдяки швидкому узгодженню планів із фактичним станом виробництва, зменшенню простоїв та кількості перебудовань і переходу від постфактумного контролю до превентивної адаптації.

Енергетична проєкція цифрового двійника безпосередньо пов'язує виробничі дані з вартісними та енергетичними критеріями: на основі телеметрії визначає споживання, моделює термодинамічні й технологічні зв'язки та пропонує дії для зменшення піків, перерегулювань і збитків без втрати продуктивності. Урахування енергетичних обмежень у плануванні й диспетчеризації переводить керування від реактивного до превентивної оптимізації профілю навантаження, знижуючи собівартість і поліпшуючи керованість за цінової волатильності [5].

У середовищах підвищеної надійності й безпеки потрібні спеціальні архітектурні умови. Так, ієрархія від двійників компонентів до процесів і гібридні моделі, що поєднують physics-based та data-driven підходи, зменшує невизначеність на стику ІТ та ОТ, локалізує відмови, гарантує трасованість і дотримання політик доступу. Критичною тут є дисципліна даних (ідентифікатори, атрибути, події, політики) для відтвореного зв'язування управлінських показників із першопричинами та випробуваної автоматизації циклу «виявлення – діагностика – дія» [6].

На рівні вузла цифровий двійник замикає цикл «дані – модель – керуючий вплив» у конкретному моменті. Приклад інтелектуального шпіндельного вузла представляє близнюка як динамічну віртуальну модель із мультифізичними, багатомасштабними, ієрархічними, інтегрованими та імовірнісними властивостями, побудовану на MBSE з компонентною структурою та зворотним зв'язком майже в реальному часі. Це забезпечує перехід до державно-орієнтованого керування, зниження ризику аварійних зупинок і стабільне навантаження [7, с. 80, 82–85].

У складальному виробництві подвійник формалізує зв'язок між описом виробу й послідовністю операцій: модель виробу та опис взаємозв'язків і обмежень задають технологічну послідовність, яка дає змогу перевіряти рішення на стадії проектування, уникати фізичної реконфігурації, зменшувати кількість помилок і простоїв, а під час експлуатації синхронізувати перепланування з реальними лімітами ресурсів. За цих умов управління переходить до динамічного узгодження маршрутів і завантаження [8, с. 202–204].

Для процесів із високими вимогами до безпеки запропоновано кількісний підхід до визначення впливу двійника на керованість. Тут виділяються індикатори, що пов'язують якість рішень із динамікою процесу, які розраховуються за даними двійника. На енергетичних об'єктах це охоплює порівняння вимірних та еталонних траєкторій, перевірку стабільності режимів і регуляторів та оцінювання ефективності дій у різних сценаріях з урахуванням обмежень безпеки [9].

На прикладі ливарного виробництва показано три рівні проникнення інформатики: моніторинг, керування, автоматизація, що гарантує перехід від реального відображення параметрів до пропозицій коригувань за імітаційними моделями та автоматичного ініціювання дій з оптимізацією. Інженерна процедура на виробничих даних виділяє потоки й мінімальний набір показників, що дає змогу замикати «план – факт» у горизонті зміни та узгоджувати впливи з обмеженнями й доступністю ресурсів [10, с. 41–43].

Сумісність цих результатів окреслює шлях від ідеї двійника до керованої операційної продуктивності, коли інтеграція енергетики робить диспетчеризацію чутливою до вимірюваного ефекту, архітектура для критичних середовищ забезпечує надійність і відстежуваність, локальні двійники замикають контури керування польових умовах, формалізація складання підтримує координацію, а ескалація від моніторингу до автоматизації гарантує системний план-факт закриття змінних ресурсів.

У реабілітації та модернізації інфраструктури двійник поєднує просторові описи, параметричні моделі та сценарії управління. Наприклад, для елеваторних комплексів синтез технологічних ланцюгів, просторової конфігурації та регламентів створює прозорі механізми планування та контролю як єдине джерело істини, що допомагає будувати фактичні плани з урахуванням пропускнуої спроможності й ризиків та оцінювати альтернативи їх реалізації [1, с. 12–14].

В економіко-управлінському вимірі ефекти впровадження цифрових двійників виходять за межі обладнання, поєднуючи виробничі дані, моделі продуктивності та модулі рішень, що дає змогу вирівнювати плани випуску продукції з кадровими й енергетичними обмеженнями. Зокрема, у харчовій промисловості України такий підхід забезпечує перерозподіл навантаження між змінами, переведення частини рішень у режим рекомендацій і зменшення втрат від варіативності сировини, що сприяє підвищенню керованості та стійкості підприємства [12, с. 858–861].

Методологія створення двійника складальних процесів конкретизує архітектуру «дані – моделі – рівні управління» як замкнений контур моніторингу та диспетчеризації, де синхронізація потоків комплектуючих у багатолінійному складанні й агентні уявлення елементів узгоджують черги, маршрути та такти з обмеженнями потужності. Крім того, взаємодія з MES/SCADA забезпечує постійний цикл «спостереження – оцінка – дія», де імітаційні та прогностичні моделі живлять інструкції та корекції планів, а результати повертаються в систему керування у вигляді діаграм ефективності [13, с. 61–64; 90–92].

Досвід побудови копії процесу лиття на виробничих даних підтверджує, що вдосконалення управління визначається не тільки точністю моделей, а й вибором основних характеристик і зв'язком параметрів із якістю. Навчена на реальних сигналах, модель попередньо оцінює критичні параметри лиття та встановлює правила втручання до того, як будуть порушені допуски, зменшуючи ітерації корекції відхилень, простої та підвищуючи передбачуваність випуску.

На енергетичному рівні споживання енергії розглядається як керована змінна й через цифровий двійник інтегрується в контур управління. Практика побудови такого двійника для теплового тунелю показує, що дво-напрямна комунікація параметрів між фізичною установкою та віртуальною моделлю дає змогу оптимізувати режими підігріву й утримання температури без втрати продуктивності. Отже, управлінські дії базуються на

прогнозі енергоспоживання, а не на реакції постфактум, що зменшує витрати та підтримує стабільність технологічного режиму на рівні дільниці.

Узагальнення цих результатів для української промисловості дає підстави вивчати цифровий двійник як багатопланову керувальну архітектуру. На нижньому рівні даних забезпечується синхронний збір операційних сигналів, їхня якісна валідація та зведення до ознак, релевантних до управлінських рішень. На рівні моделей – поєднання імітації дискретно-подієвих процесів, агентних уявлень номенклатури, моделей деградації та енергетичних балансів, що дає можливість виконувати обчислювально прості прогнози в робочому циклі. На рівні управління – інтеграція з диспетчерсько-планувальним контуром і механізми перевірених «що-якщо» сценаріїв, які впливають на розклад, партіонування, переналаштування обладнання та енергетичні ресурси. Така конфігурація допомагає закрити окреслені на початку розбіжності, уніфікує зміст двійника в термінах керованих змінних та інтерфейсів, уточнює місце моделей у ланцюзі рішень і робить вимірюваним внесок в ефективність управління через скорочення простоїв, зменшення енерговитрат, стабілізацію якості та підвищення передбачуваності здійснення плану з урахуванням кадрових і ресурсних нестач.

Цифровий двійник, згідно зі сформульованим теоретичним осмисленням, виконує функції узгоджувача між даними, моделями та рішеннями. Його впровадження є частиною промислового контуру керування, що збільшує ефективність управління виробничими процесами на рівні цеху, дільниці й підприємства. Для українських підприємств це означає можливість стандартизовано застосовувати такий підхід у критичній інфраструктурі та в галузях, що працюють у режимі ресурсних і кадрових обмежень, не змінюючи базової логіки планування й диспетчеризації, але роблячи її дано-керованою та прогнозно-орієнтованою.

Висновки

Теоретичний внесок дослідження полягає у створенні узгодженої рамки «дані – моделі – рішення», яка поєднує поняття цифрового двійника з його управлінськими ролями у виробництві та систематизує архітектуру, моделі й рівні управління з механізмами підтримки рішень. Встановлено, що вирішальний вплив на результат мають дисципліни даних (якість, повнота, своєчасність), а прозорий перехід від вимірювань до керувальних дій забезпечує атрибуцію ефектів і поліпшує керованість процесів.

Типовими практичними наслідками впровадження цифрових двійників (за матеріалами фахової літератури та кейсів) є скорочення тривалості операцій та енерговитрат, підвищення передбачуваності виконання плану та стабільності якості завдяки зменшенню внутрішньої варіабельності процесів. Водночас аналіз джерел і практик виявляє низку обмежень, зокрема неузгодженість термінів і ролей між ІТ та ОТ, неформальні інтеграційні зв'язки між цифровим двійником і суміжними системами, незначна кількість методів, що пов'язують прогнози двійника з управлінськими КРІ, відсутність процедур для оцінювання та керування невизначеністю в гібридних моделях, складність інтеграції зі спадковою (legacy) інфраструктурою, потреба гарантувати кібербезпеку без втрати швидкодії.

Перспективи дослідження полягають у розробленні прозорих методів причинно-наслідкової атрибуції впливу цифрових двійників на управлінські та економічні показники підприємств у різних галузях.

Список використаної літератури

1. Attaran S., Attaran M., Celik B. G. Digital twins and industrial internet of things: uncovering operational intelligence in industry 4.0. *Decision Analytics Journal*. 2024. Vol. 10. 100398. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100398>.
2. Onaji I., Tiwari D., Soulatiantork P., Song B., Tiwari A. Digital twin in manufacturing: conceptual framework and case studies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2022. Vol. 35, № 8. P. 831–858. DOI: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2027014>.
3. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing. Part 1: Overview and general principles. *International Organization for Standardization*, 2021. URL: <https://www.iso.org/standard/75186.html>.
4. Macchi M., Ragazzini L., Negri E. A conceptual framework for digital twins in production scheduling and control. *IFAC-PapersOnLine*. 2023. Vol. 56, № 2. P. 5661–5666. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.491>.
5. Billey A., Wuest T. Predictive maintenance with digital twins: research landscape and future directions. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024. Vol. 83. 102729. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102729>.
6. Щеглов В. Р., Морозова О. І. Методи та технології розроблення цифрових двійників для гарантоздатних систем індустріального інтернету речей. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. Т. 4, № 70. С. 127–137. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.127>.
7. Сапон С. П. Концепція створення моделі цифрового двійника інтелектуального шпіндельного вузла. *Технічні науки та технології*. 2022. № 4 (30). С. 80–90. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-80-90](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-80-90).
8. Філіппова М. В., Демченко М. О., Філіппов О. В., Заєць С. В. Використання цифрового двійника для складального виробництва. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 335, № 3 (1). С. 202–208. DOI: <https://doi.org/10.31891//2307-5732-2024-335-3-28>.

9. Бровко К., Буданов П., Великогорський О., Винокурова Н. Забезпечення кількісної оцінки якості управління технологічним процесом енергоблока АЕС із застосуванням цифрового двійника. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інформатика та моделювання*. 2025. № 3 (25). С. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.03.01>.
10. Doroshenko V. S., Kravchenko V. P., Tokova O. V. Development of a digital twin of the technological process of consumable pattern casting using production data. *Control Systems and Computers*. 2020. № 3. P. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.15407/csc.2020.03.040>.
11. Титаренко В., Костецька С., Бабік К., Дворнік А., Юрко П. Використання цифрових двійників для відновлення пошкоджених об'єктів елеваторних комплексів. *Наука та будівництво*. 2025. Т. 44, № 2. С. 12–27. DOI: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2025-2>.
12. Мазник Л. В., Жуковська К. В. Використання технології цифрових двійників для компенсації кадрового дефіциту та модернізацію харчової промисловості України. *Економіка та суспільство*. 2025. № 78. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-78-152>.
13. Філіппов О. В. Цифровий двійник виробничого процесу складання виробів: магістерська дис. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 99 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/71382>.

References

1. Attaran, S., Attaran, M., & Celik, B. G. (2024). Digital twins and Industrial Internet of Things: Uncovering operational intelligence in Industry 4.0. *Decision Analytics Journal*, 10, 100398. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100398>.
2. Onaji, I., Tiwari, D., Soulatiantork, P., Song, B., & Tiwari, A. (2022). Digital twin in manufacturing: Conceptual framework and case studies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 35(8), 831–858. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2027014>.
3. International Organization for Standardization. (2021). *ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing. Part 1: Overview and general principles*. <https://www.iso.org/standard/75186.html>.
4. Macchi, M., Ragazzini, L., & Negri, E. (2023). A conceptual framework for digital twins in production scheduling and control. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 5661–5666. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.491>.
5. Billey, A., & Wuest, T. (2024). Predictive maintenance with digital twins: Research landscape and future directions. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 83, 102729. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102729>.
6. Shcheglov, V. R., & Morozova, O. I. (2022). *Metody ta tekhnologii rozroblennia tsyfrovyykh dviinykiv dlia harantozdatnykh system industrialnoho internetu rechei* [Methods and technologies for developing digital twins for fault-tolerant IIoT systems]. *Systemy Upravlinnia, Navihatsii ta Zv'iazku*, 4(70), 127–137. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.127>.
7. Sapon, S. P. (2022). *Kontseptsiiia stvorennia modeli tsyfrovoho dviinyka intelektualnoho shpyndelnoho vuzla* [Concept for creating a digital twin model of an intelligent spindle unit]. *Tekhnichni Nauky ta Tekhnologii*, 4(30), 80–90. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-80-90](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-80-90).
8. Filippova, M. V., Demchenko, M. O., Filippov, O. V., & Zaiets, S. V. (2024). *Vykorystannia tsyfrovoho dviinyka dlia skladalnoho vyrobnytstva* [Using a digital twin for assembly production]. *Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni Nauky*, 335(3–1), 202–208. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-335-3-28>.
9. Brovko, K., Budanov, P., Velykohortskyy, O., & Vynokurova, N. (2025). *Zabezpechennia kilkisnoi otsinky yakosti upravlinnia tekhnolohichnym protsesom enerhobloka AES iz zastosuvanniam tsyfrovoho dviinyka* [Ensuring quantitative assessment of control quality for an NPP power-unit process using a digital twin]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Informatyka ta Modeliuvannia*, (3(25)), 3–12. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.03.01>.
10. Doroshenko, V. S., Kravchenko, V. P., & Tokova O. V. (2020). Development of a digital twin of the technological process of consumable pattern casting using production data. *Control Systems and Computers*, (3), 40–49. DOI: <https://doi.org/10.15407/csc.2020.03.040>.
11. Tytarenko, V., Kostetska, S., Babik, K., Dvornik, A., & Yurko, P. (2025). *Vykorystannia tsyfrovyykh dviinykiv dlia vidnovlennia poskodzhenykh ob'ektiv elevatorykh kompleksiv* [Using digital twins to restore damaged objects of elevator complexes]. *Nauka ta Budivnytstvo*, 44(2), 12–27. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2025-2>.
12. Maznyk, L. V., & Zhukovska, K. V. (2025). *Vykorystannia tekhnologii tsyfrovyykh dviinykiv dlia kompensatsii kadrovoho defitsytu ta modernizatsiiu kharchovoi promyslovosti Ukrainy* [Using digital twin technology to offset staff shortages and modernize Ukraine's food industry]. *Ekonomika ta Suspilstvo*, 78. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-78-152>.
13. Filippov, O. V. (2024). *Tsyfrovyy dviinyk vyrobnychoho protsesu skladannia vyrobiv* [Digital twin of the product assembly process] (Master's thesis, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute). <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/71382>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

О. А. МЕЛЬНИКОВА

кандидат технічних наук,
доцент кафедри безпеки інформаційних технологій
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0001-8843-9648

С. В. ГРАСМІК

студентка бакалаврату кафедри безпеки інформаційних технологій
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0008-5521-9831

О. Є. ПЕТРЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри безпеки інформаційних технологій
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0002-7862-5399

І. В. ОЛЕШКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри безпеки інформаційних технологій
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0002-8021-0467

СТВОРЕННЯ АЛГОРИТМІВ ПРИВЕДЕННЯ ПО ФІКСОВАНИМ МОДУЛЯМ ДЛЯ КРИПТОСИСТЕМ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ АРИФМЕТИКУ РОЗШИРЕНИХ ДВІЙКОВИХ ПОЛІВ

Низка діючих вітчизняних стандартів, зокрема цифрового підпису [1] та блокового симетричного шифрування [2], використовує арифметику розширених двійкових полів $GF(2^m)$ на основі поліноміального базису для криптографічних перетворень. Для високого рівня стійкості криптографічні стандарти рекомендують великі значення m для поля $GF(2^m)$. Зокрема, стандарт [1] визначає 60 варіантів незвідних поліномів $f(t)$ з простими степенями m від 163 до 509. А стандарт [2] використовує 3 варіанти незвідних поліномів $f(t)$ для парних значень m , визначених бітовими розмірами блоку шифру (128, 256 чи 512). При великих m операції в полі $GF(2^m)$ мають високу обчислювальну складність. Одним із ключових обмежувальних факторів швидкодії є операція приведення по модулю $f(t)$ (редукція), і зменшення її складності є критично важливим для реалізацій у режимі реального часу.

Загальні методи модулярної редукції не завжди враховують особливості оптимізації для конкретного незвідного модуля $f(t)$ m -го степеню (триному чи пентаному). Розробка алгоритмів редукції, оптимізованих саме з прив'язкою до рекомендованих стандартами фіксованих значень $f(t)$, може зменшувати обчислювальну складність, в тому числі й при апаратній реалізації. Зменшення складності досягається завдяки незмінності модуля $f(t)$ протягом сеансу, що дозволяє інтегрувати попередні розрахунки безпосередньо в структуру алгоритмів приведення по модулю.

Стаття присвячена створенню та дослідженню множин алгоритмів приведення по фіксованим модулям $f(t)$ з метою оптимізації базових операцій у криптосистемах, що використовують $GF(2^m)$. Розглянуто методику створення подібних алгоритмів, яка дозволяє формалізувати та частково автоматизувати їх створення. Можливість програмної автоматизації цього процесу є важливою, оскільки стандарти рекомендують велику кількість варіантів полів $GF(2^m)$. Також вона необхідна для забезпечення формалізованого підходу до перевірки коректності та тестування цих реалізацій.

Результатом роботи є розробка серії оптимізованих алгоритмів приведення по модулю, прив'язаних до модулів, які рекомендовані українськими криптографічними стандартами.

Ключові слова: алгоритми приведення за модулем, арифметика розширених двійкових полів, приведення за фіксованими модулями, оптимізація алгоритмів, криптоалгоритми.

O. A. MELNYKOVA

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Information Technology Security
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0001-8843-9648

S. V. HRASMIK

Bachelor's Student at the Department of Information Technology Security
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0008-5521-9831

O. YE. PETRENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Information Technology Security
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0002-7862-5399

I. V. OLESHKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Information Technology Security
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0002-8021-0467

DESIGN OF FIXED MODULI MODULAR REDUCTION ALGORITHMS FOR CRYPTOSYSTEMS THAT USE EXTENDED BINARY FIELD ARITHMETIC

A number of current domestic standards, including the digital signature standard [1] and the block symmetric encryption standard [2], utilize extended binary field arithmetic $GF(2^m)$ based on a polynomial basis for cryptographic transformations. To ensure a high level of cryptographic resilience, these standards recommend large values of m for the $GF(2^m)$ field. Specifically, standard [1] defines 60 variants of irreducible polynomials $f(t)$ with prime degrees m ranging from 163 to 509, while standard [2] uses 3 variants of irreducible polynomials $f(t)$ for even values of m (128, 256, or 512), corresponding to the cipher's block sizes. Operations within the $GF(2^m)$ field incur high computational complexity for large values of m . The operation of modular reduction by $f(t)$ is a key limiting performance factor, and reducing its complexity is critical for real-time implementations.

General methods of modular reduction do not always account for the specific optimization properties of a particular irreducible modulus $f(t)$ of degree m (a trinomial or a pentanomial). Developing reduction algorithms optimized specifically for the fixed values of $f(t)$ specified by standards can decrease computational complexity, particularly in hardware implementations. This complexity reduction is achieved because the modulus $f(t)$ remains invariant throughout the session, which enables the integration of pre-calculations directly into the structure of the reduction algorithms.

This article focuses on the creation and analysis of sets of algorithms for reduction by fixed moduli $f(t)$, aiming to optimize basic operations in cryptosystems that utilize $GF(2^m)$. We consider a method for creating such algorithms that enables their formalization and partial automation. The possibility of software automation is crucial, since standards recommend a large number of $GF(2^m)$ field variants. Furthermore, it is also necessary to ensure a formalized approach for verifying the correctness and testing these implementations.

The research resulted in the development of a series of optimized modular reduction algorithms tied to the specific moduli recommended by Ukrainian cryptographic standards.

Key words: modular reduction algorithms, extended binary fields arithmetic, reduction with fixed moduli, algorithms optimization, cryptographic algorithms.

Постановка проблеми

Сучасний розвиток інформаційних технологій та зростання обсягів даних висувають підвищені вимоги до продуктивності та криптографічної стійкості засобів захисту інформації. Забезпечення конфіденційності, цілісності та автентичності інформації є критично важливою науковою та практичною задачею. Для її вирішення застосовують надійні криптографічні стандарти, як міжнародні, так і вітчизняні. Низка цих стандартів використовує операції в розширеному двійковому полі $GF(2^m)$ для великих значень m . Як правило, в поліноміальному базисі, якщо мова не йде про виключно апаратні реалізації деяких алгоритмів, де має сенс застосовувати оптимальний нормальний базис.

Серед прикладів таких стандартів можна назвати цифровий підпис ДСТУ 4145-2002 [1], блоковий симетричний шифр "Калина" (ДСТУ 7624:2014) [2] в режимах GCM, GMAC, XTS/XTS-p. Міжнародні стандарти щодо режимів блокових симетричних шифрів (таких, як AES), які підтримують автентифікацію та спеціалізоване

шифрування сховищ (GCM, GMAC [3,4], XTS [5,6]). До них же відносяться різні міжнародні стандарти цифрового підпису в групах точок еліптичних кривих (ЕК) [7-10], які використовують варіант ЕК над полем $GF(2^m)$, а також деякі стандарти протоколів встановлення ключів [11-12] та навіть несиметричного шифрування [13]. І це далеко не повний перелік подібних стандартів та криптографічних алгоритмів.

Реалізація подібних криптографічних перетворень вимагає високоефективного виконання операцій множення з модульною редукцією у розширених двійкових полях $GF(2^m)$. Саме швидкість реалізації цих операцій часто стає обмежувальним фактором продуктивності всього криптографічного алгоритму. Проблема у загальному вигляді полягає у необхідності розробки нових, або суттєвого підвищення ефективності існуючих алгоритмів арифметики $GF(2^m)$, здатних забезпечити необхідну пропускну здатність криптографічних пристроїв на рівні сучасних вимог.

В цій роботі розглядається розробка алгоритмів поліноміальної редукції зі зменшеною обчислювальною складністю для полів $GF(2^m)$ з великими значеннями m . Наприклад такими, що використовуються в режимах блокового симетричного шифру [2] ($m = 128, 256, 512$ в залежності від бітового розміру блоку шифру) та в цифровому підпису [1], де значення m є простими числами в діапазоні від 163 до 509.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Математичний та алгоритмічний апарат виконання базових операцій в полі $GF(2^m)$ і, зокрема, операції приведення по модулю незвідного полінома (тринома чи пентаному), представлено як в криптографічних стандартах, наприклад [1, 14], монографіях [15-18], так і в низці наукових публікацій [19-25]. При цьому аналізуються як варіанти поліноміального, так і оптимального нормального базису представлення елементів $GF(2^m)$. Хоча для програмної реалізації найчастіше використовуються алгоритми в поліноміальному базисі (як більш швидкі), а нормальний базис зазвичай призначений для апаратних реалізацій.

Серед базових операцій в $GF(2^m)$ найбільш обчислювально складними є множення та приведення за модулем (редукція). Можна виділити такі основні типи алгоритмів редукції (приведення за модулем):

- 1) побітова редукція;
- 2) побітовий варіант редукції з попередніми обчисленнями; зокрема, особливі варіанти “одночасної” редукції для модулів зі стандарту [2] (блоковий симетричний шифр “Калина” в режимах GMAC, GCM, XTS/XTS-p);
- 3) порозрядна редукція за довільним модулем (триномом / пентаномом) (зокрема варіанти, згадані в додатку В.3 стандарту [1]);
- 4) порозрядна редукція за заданим незмінним модулем (триномом / пентаномом) (один з прикладів якої наведено в різних літературних джерелах, зокрема, в [15, 19]).

В цьому контексті розмір “розрядів” зазвичай прив’язується до розміру машинного слова певної обчислювальної техніки (32, 64 розряди), хоча не виключено й використання більших значень (наприклад, 128 при застосуванні SSE). Алгоритми в цьому переліку наведено, здебільшого, в порядку зменшення їх обчислювальної складності. Хоча додатково треба враховувати як максимальний бітовий розмір m у представленні елементів базового поля $GF(2^m)$, так і особливості обраних поліномів-модулів $f(t)$. Наприклад, чи є вони триномами чи пентаномами, як розташований в пам’яті старший біт модуля (на межі розрядів чи всередині), як згруповані в пам’яті молодші коефіцієнти модуля (в межах якої кількості розрядів) і т.і. Бо ці фактори можуть змінити співвідношення обчислювальної складності для деяких алгоритмів з цього списку (зокрема, для “одночасної” редукції).

Формулювання мети дослідження

Серед алгоритмів, наведених у списку вище, саме порозрядні алгоритми приведення по модулю потенційно можуть бути краще оптимізовані, в тому числі при апаратній реалізації, за рахунок більш точного використання можливостей розпаралеленої обробки, якщо реалізуються окремо для кожного варіанту незвідного полінома-модуля $f(t)$, який визначає розширене двійкове поле $GF(2^m)$. Тобто це так званий варіант порозрядної редукції за заданим фіксованим модулем (триномом / пентаномом).

Мається на увазі що параметри певного поля в криптосистемі використовуються є незмінними (фіксованими) протягом досить довгого сеансу використання. Наприклад, для криптосистем з використанням ЕК над $GF(2^m)$ варіанти ЕК (визначені для певного примітивного поліному-модулю степеню m) можуть змінюватись не часто, що дозволяє використовувати той самий незмінний поліном $f(t)$. А при використанні згаданих раніше режимів блокових симетричних шифрів m взагалі залежить від бітового розміру блоку шифру (наприклад, 128, 256, 512 для [2]), тобто взагалі не змінюється в межах певної версії алгоритму шифрування.

Проблемним в цій ситуації є те, що криптографічні стандарти можуть рекомендувати досить великі списки варіантів базового поля $GF(2^m)$, тобто поліномів-модулів $f(t)$ степеню m . Так, наприклад, вітчизняний стандарт цифрового підпису [1] визначає 60 варіантів примітивних поліномів $f(t)$ для простих значень m в діапазоні від 163 до 509, а стандарт [9] в попередній версії використовував навіть більше значення $m = 571$. Тобто таких алгоритмів, окремо для кожного фіксованого модуля, має бути досить багато. В літературі зазвичай наводиться, в якості прикладів подібних алгоритмів, лише декілька варіантів для невеликих значень m (163, 167) [15, 19]. І, як правило, саме для пентаномів, а не для триномів. Тому потрібно сформулювати методику побудови подібних алгоритмів, яку

можна програмно автоматизувати та полегшити завдання як по створенню формалізованих описів цих алгоритмів, так і по перевірці коректності та тестуванню створених на їх основі програмних реалізацій.

Викладення основного матеріалу дослідження

Формування параметрів алгоритмів порозрядної редукції при фіксованому модулі розглядається для розрядів розміром $W=32$ (біти). Для прикладу в роботі наведено сформовані програмно таблиці розрахункових коефіцієнтів для модулів з нижченаведеного переліку.

- 1) $f(t) = t^{503} + t^3 + 1$ – трином для максимального простого m , з рекомендованих в [1];
- 2) $f(t) = t^{509} + t^{23} + t^3 + t^2 + 1$ – пентаном для максимального простого m , з рекомендованих в [1];
- 3) $f(t) = t^{512} + t^8 + t^5 + t^2 + 1$ – пентаном для максимального парного m , з рекомендованих в [2].

Демонстраційні варіанти модулів обиралися з міркувань покриття основних тестових випадків. Розрахункові коефіцієнти для побудування алгоритмів редукції за цими модулями наведено в таблицях 1-3, відповідно.

Побудування таблиці розрахункових коефіцієнтів за заданим модулем $f(t)$ при розміру розрядів $W=32$

Таблиця 1

Розрахункові коефіцієнти для триному $f(t) = t^{503} + t^3 + 1; W=32$

In		S_{32} розряд		In		S_{17} розряд		In		S_{16} розряд	
Out		r_1	r_2	Out		r_1	r_2	Out		r_1	r_2
	17	FFF	1FF		2	FFF	1FF		1	FF8	1FF
	16	FFFFFF000	FFFFFFE00		1	FFFFFF000	FFFFFFE00		-	-	-

Таблиця 2

Розрахункові коефіцієнти для пентаному $f(t) = t^{509} + t^{23} + t^3 + t^2 + 1; W=32$

In		S_{32} розряд			
Out		r_1	r_2	r_3	r_4
	17	3FFFFFF	3F	1F	7
	16	FC000000	FFFFFFC0	FFFFFFE0	FFFFFFF8
In		S_{17} розряд			
Out		r_1	r_2	r_3	r_4
	2	3FFFFFF	3F	1F	7
	1	FC000000	FFFFFFC0	FFFFFFE0	FFFFFFF8
In		S_{16} розряд			
Out		r_1	r_2	r_3	r_4
	1	38000000	38	1C	7
	-	-	-	-	-

Порівняння таблиці 1 з таблицями 2 та 3 демонструє спрощеність процесу формування розрахункових коефіцієнтів для триномів порівняно з пентаномами.

Таблиця 3

Розрахункові коефіцієнти для пентаному $f(t) = t^{512} + t^8 + t^5 + t^2 + 1; W=32$

In		S_{34} розряд			
Out		r_1	r_2	r_3	r_4
	19	FF	1F	3	0
	18	FFFFFFF00	FFFFFFE0	FFFFFFFC	FFFFFFF
In		S_{18} розряд			
Out		r_1	r_2	r_3	r_4
	3	FF	1F	3	0
	2	FFFFFFF00	FFFFFFE0	FFFFFFFC	FFFFFFF
In		S_{17} розряд			
Out		r_1	r_2	r_3	r_4
	2	FF	1F	3	0
	1	FFFFFFF00	FFFFFFE0	FFFFFFFC	FFFFFFF

Побудування алгоритму редукції по таблиці розрахункових коефіцієнтів для заданого модуля $f(t)$ при розміру розрядів $W=32$

Розглянемо побудування алгоритмів порозрядної редукції по сформованим раніше таблицям розрахункових коефіцієнтів за модулями з наведеного раніше переліку. В цьому розділі наведено лише декілька зі створених

алгоритмів приведення по модулю (3 з 68 побудованих тестових варіантів). Умовні позначення: M – розмір модуля $f(t)$ у W -бітових розрядах; M – вхідного $s(t)$, яке треба привести по модулю $f(t)$, у W -бітових розрядах (найчастіше $N=2 \cdot M$, хоча теоретично може бути будь-яким, в межах розрядної сітки, яку підтримує певна версія спеціалізованої бібліотеки для зберігання великих значень). Для всіх подальших алгоритмів:

$$\text{IN: } s(t) = (s_{2m-2} \dots s_1 s_0)_2 = (S_N \dots S_2 S_1)_2^w.$$

$$\text{OUT: } s(t) = s(t) \bmod f(t).$$

На виході алгоритму:

$$\deg(s(t)) \leq m-1, \text{ тобто } s(t) = (s_{t-1} \dots s_1 s_0)_2 = (S_L \dots S_2 S_1)_2^w; t \leq m-1; L \leq M.$$

Наведені приклади алгоритмів порозрядної редукції за фіксованим модулем побудовані з використанням розрахункових коефіцієнтів з таблиць 1-3.

Алгоритм 1. Редукція за модулем $f(t) = t^{503} + t^3 + 1$

1. for ($i = N-1$; $i \geq M-1$; $i--$) // по W -бітовим розрядам $s(t)$

1.1. $T = S_i$;

1.2. $S_{i-16} \oplus = (T \ll 8) \oplus (T \ll 5) \oplus (T \ll 2) \oplus T$;

1.3. $S_{i-15} \oplus = (T \gg 24) \oplus (T \gg 27) \oplus (T \gg 30)$;

5. // корекція (нормалізація) довжини $s(t)$;

Для швидкої зміни варіантів модулів, яка не буде впливати на обчислювальну складність критичних за часом виконання відрізків програмного коду можна використовувати масив вказівників на окремі функції редукції за різними модулями. Обрання певного елемента з цього масиву (тобто обрання функції редукції за певним модулем) виконувати при ініціалізації поточного варіанту базового поля. Так, для цифрових підписів в групах точок ЕК це буде відбуватися лише один раз при початковому встановленні параметрів ЕК та базового поля, тобто нечасто та в некритичні проміжки часу. А для шифрів обрання функції редукції за певним модулем за рахунок звернення до певного елемента масиву вказівників на функції редукції відбуватиметься взагалі тільки при переході до іншої версії шифру (з іншою бітовою довжиною блока шифру).

Висновки

В ході досліджень створені та перевірені на коректність, в тому числі за рахунок тестування відповідного програмної бібліотеки, близько 68 оптимізованих алгоритмів приведення по фіксованим модулям, прив'язаних до рекомендацій криптографічних стандартів: 60 модулів з [1], 3 модулі з [2], 4 з [9] та декілька додаткових тестових значень. Всі алгоритми були перевірені на коректність та пройшли ретельне тестування за рахунок перевірки результатів відповідних програмних реалізацій. Експерименти показали зменшення часу виконання порівняно з алгоритмами редукції інших типів (побітових варіантів, порозрядних для довільних триномів або пентаномів). Зі збільшенням значень m різниця в часі виконання стає більш помітною.

На базі цієї ж методики можна перейти до узагальнення та побудувати алгоритми редукції $W \geq 64$. Це дозволить зменшити обчислювальну складність алгоритмів редукції через зменшення кількості ітерацій основного циклу.

Список використаної літератури

1. ДСТУ 4145-2002. Інформаційні технології. Криптографічний захист інформації. Цифровий підпис, що ґрунтується на еліптичних кривих. Формування та перевіряння: [Чинний від 2003–07–01]. Київ: Держстандарт України, 2002. 35 с. (Національний стандарт України).
2. ДСТУ 7624:2014. Інформаційні технології. Криптографічний захист інформації. Алгоритм симетричного блокового перетворення: [Чинний від 2015–07–01]. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 228 с. (Національний стандарт України).
3. NIST SP 800-38D. Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: Galois/Counter Mode (GCM) and GMAC. Gaithersburg, MD: *National Institute of Standards and Technology (NIST)*, 2007. 39 p. (NIST Special Publication).
4. ISO/IEC 19772:2020. Information security – Authenticated encryption. Geneva: *ISO/IEC*, 2020. 40 p.
5. NIST SP 800-38E. Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: The XTS-AES Mode for Confidentiality on Storage Devices. Gaithersburg, MD: *National Institute of Standards and Technology (NIST)*, 2010. 21 p. (NIST Special Publication).
6. IEEE Std 1619-2007. Standard for Cryptographic Protection of Data on Block-Accessible Storage Devices. New York: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2008. 48 p. (Reaffirmed 2018).
7. ДСТУ ISO/IEC 14888-3:2018. Інформаційні технології. Методи захисту. Цифрові підписи з додатком. Частина 3. Механізми на основі дискретного логарифму: [Чинний від 2019–01–01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 114 с. (Національний стандарт України).
8. ANSI X9.62-2005. Public Key Cryptography for the Financial Services Industry: The Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA). Washington, D.C.: *ANSI*, 2005. 50 p. (Reaffirmed 2011).
9. FIPS 186-4. Digital Signature Standard (DSS). Gaithersburg, MD: *National Institute of Standards and Technology (NIST)*, 2013. 98 p. (U.S. Department of Commerce).

10. IEEE 1363a-2004. Standard Specifications for Public-Key Cryptography – Amendment 1: Additional Public-Key Techniques. New York: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2004. 70 p. (Amendment to IEEE 1363-2000).
11. NIST SP 800-56A Rev. 3. Recommendation for Pair-Wise Key-Establishment Schemes Using Discrete Logarithm Cryptography. Gaithersburg, MD: *National Institute of Standards and Technology (NIST)*, 2018. 143 p. (NIST Special Publication).
12. ANSI X9.63-2011. Public Key Cryptography for the Financial Services Industry: Key Establishment Techniques. Washington, D.C.: *ANSI*, 2011. 82 p. (Reaffirmed 2016).
13. ISO/IEC 18033-2:2006. Information technology – Security techniques – Encryption algorithms – Part 2: Asymmetric ciphers. Geneva: *ISO/IEC*, 2006. 138 p.
14. ДСТУ ISO/IEC 15946-1:2017. Інформаційні технології. Методи захисту. Криптографічні методи, що ґрунтуються на еліптичних кривих. Частина 1. Загальні положення: [Чинний від 2017–12–18]. Київ: УкрНДНЦ, 2017. 42 с. (Національний стандарт України).
15. Hankerson D.R., Menezes A.J., Vanstone S.A. Guide to Elliptic Curve Cryptography. New York, NY: *Springer-Verlag*, 2004. 320 p.
16. Cohen H., Frey G., Bailey D. H. та ін. Handbook of Elliptic and Hyperelliptic Curve Cryptography. Boca Raton: *Chapman and Hall/CRC*, 2006. 824 p.
17. Washington L. C. Elliptic Curves: Number Theory and Cryptography. Boca Raton, FL: *Chapman and Hall/CRC*, 2008. 536 p.
18. Menezes A. J., van Oorschot P. C., Vanstone S. A. Handbook of Applied Cryptography. Boca Raton, FL: *CRC Press*, 1996. 816 p.
19. Hankerson D., López J. H., Menezes A. J. Software implementation of the NIST elliptic curves over binary fields. *B Selected Areas in Cryptography: International Workshop (SAC 2000)*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2001. P. 1–19. (Lecture Notes in Computer Science ; Vol. 2012).
20. Hasan S. M. A., Bandara M. L. S. D. K. S., Al-Amin S. M. K. та ін. An Efficient and Lightweight Architecture for Modular Reduction in $GF(2^m)$ based on Hybrid Polynomial Representation. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 49302–49313.
21. Ghouma S. A., Al-Sarayrah F. S., Al-Shurman O. A. M. High-Performance Polynomial Basis Multiplier for $GF(2^m)$ using Karatsuba-like Algorithm. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 11054–11065.
22. Chowdhury M. M. I., Hasan M. A. Efficient hardware implementation of extended Euclidean algorithm for $GF(2^m)$ on FPGA. *Microprocessors and Microsystems*. 2023. Vol. 101. 104889.
23. Islam M. S., Hwang Y. S. High-performance and efficient finite field arithmetic for cryptographic applications. *Journal of Circuits, Systems and Computers*. 2022. Vol. 31, Issue 4. 2250064 (16 p.).
24. Hasan M. A., Lwin T. K., Tso K. S. Efficient Implementation of Binary Field Multipliers using Modified Karatsuba Algorithm. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 110903–110915.
25. Certik J., Hankerson D., Menezes A. High-speed software implementation of the NIST recommended elliptic curves over $GF(2^m)$. *IEEE Transactions on Computers*. 2003. Vol. 52, Issue 8. P. 1060–1070.

References

1. Derzhstandart Ukrainy. (2002). Informatsiini tekhnolohii. Kryptohrafichnyi zakhyst informatsii. Tsyfrovyi pidpys, shcho hruntuiet'sia na eliptychnykh kryvykh. Formuvannia ta pereviriannia [Information technologies. Cryptographic protection of information. Digital signature based on elliptic curves. Generation and verification] (DSTU 4145-2002). Kyiv: Derzhstandart Ukrainy. [in Ukrainian].
2. Minekonomrozvytku Ukrainy. (2014). Informatsiini tekhnolohii. Kryptohrafichnyi zakhyst informatsii. Alorytm symetrychnoho blokovooho peretvorennia [Information technologies. Cryptographic protection of information. Symmetric block cipher algorithm] (DSTU 7624:2014). Kyiv: Minekonomrozvytku Ukrainy. [in Ukrainian].
3. NIST. (2007). Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: Galois/Counter Mode (GCM) and GMAC (SP 800-38D). *National Institute of Standards and Technology*.
4. ISO/IEC. (2020). Information security – Authenticated encryption (ISO/IEC 19772:2020). *ISO/IEC*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/76508.html>
5. NIST. (2010). Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: The XTS-AES Mode for Confidentiality on Storage Devices (SP 800-38E). *National Institute of Standards and Technology*.
6. IEEE. (2008). Standard for Cryptographic Protection of Data on Block-Accessible Storage Devices (Std 1619-2007). *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2008.4554890>
7. DP "UkrNDNTs". (2018). Informatsiini tekhnolohii. Metody zakhystu. Tsyfrovi pidpysy z dodatkom. Chastyna 3. Mekhanizmy na osnovi dyskretnoho loharyfmu [Information technology. Security techniques. Digital signatures with appendix. Part 3. Discrete logarithm-based mechanisms] (DSTU ISO/IEC 14888-3:2018). Kyiv: DP "UkrNDNTs". [in Ukrainian].
8. ANSI. (2005). Public Key Cryptography for the Financial Services Industry: The Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA) (X9.62-2005). *American National Standards Institute*.

9. NIST. (2013). Digital Signature Standard (DSS) (FIPS 186-4). *National Institute of Standards and Technology*.
10. IEEE. (2004). Standard Specifications for Public-Key Cryptography – Amendment 1: Additional Public-Key Techniques (IEEE 1363a-2004). *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2004.95727>
11. NIST. (2018). Recommendation for Pair-Wise Key-Establishment Schemes Using Discrete Logarithm Cryptography (SP 800-56A Rev. 3). *National Institute of Standards and Technology*. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-56Ar3>
12. ANSI. (2011). Public Key Cryptography for the Financial Services Industry: Key Establishment Techniques (X9.63-2011). *American National Standards Institute*.
13. ISO/IEC. (2006). Information technology – Security techniques – Encryption algorithms – Part 2: Asymmetric ciphers (ISO/IEC 18033-2:2006). *ISO/IEC*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/40733.html>
14. UkrNDNTs. (2017). Informatsiini tekhnolohii. Metody zakhystu. Kryptohrafichni metody, shcho hruntuiut'sia na eliptychnykh kryvykh. Chastyna 1. Zahalni polozhennia [Information technology. Security techniques. Cryptographic techniques based on elliptic curves. Part 1. General] (DSTU ISO/IEC 15946-1:2017). Kyiv: UkrNDNTs. [in Ukrainian].
15. Hankerson, D. R., Menezes, A. J., & Vanstone, S. A. (2004). Guide to Elliptic Curve Cryptography. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/b97644>
16. Cohen, H., Frey, G., Avanzi, R. M., Doche, C., Lange, T., Nguyen, K., & Vercauteren, F. (2006). Handbook of Elliptic and Hyperelliptic Curve Cryptography. *Chapman and Hall/CRC*. <https://doi.org/10.1201/9781420010903>
17. Washington, L. C. (2008). Elliptic Curves: Number Theory and Cryptography. *Chapman and Hall/CRC*. <https://doi.org/10.1201/9781420011801>
18. Menezes, A. J., van Oorschot, P. C., & Vanstone, S. A. (1996). Handbook of Applied Cryptography. *CRC Press*. <https://doi.org/10.1201/9781439821916>
19. Hankerson, D., López, J. H., & Menezes, A. J. (2001). Software implementation of the NIST elliptic curves over binary fields. In *Selected Areas in Cryptography: International Workshop (SAC 2000)* (Vol. 2012, pp. 1–19). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-45372-5_1
20. Hasan, S. M. A., Bandara, M. L. S. D. K. S., Al-Amin, S. M. K., Al-Qutayri, M., & Al-Haj Hasan, M. I. (2024). An Efficient and Lightweight Architecture for Modular Reduction in $GF(2^m)$ based on Hybrid Polynomial Representation. *IEEE Access*, 12, 49302–49313. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3385759>
21. Ghouma, S. A., Al-Sarayrah, F. S., & Al-Shurman, O. A. M. (2023). High-Performance Polynomial Basis Multiplier for $GF(2^m)$ using Karatsuba-like Algorithm. *IEEE Access*, 11, 11054–11065. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3238618>
22. Chowdhury, M. M. I., & Hasan, M. A. (2023). Efficient hardware implementation of extended Euclidean algorithm for $GF(2^m)$ on FPGA. *Microprocessors and Microsystems*, 101, 104889. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2023.104889>
23. Islam, M. S., & Hwang, Y. S. (2022). High-performance and efficient finite field arithmetic for cryptographic applications. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 31(4), 2250064. <https://doi.org/10.1142/S021812662250064X>
24. Hasan, M. A., Lwin, T. K., & Tso, K. S. (2021). Efficient Implementation of Binary Field Multipliers using Modified Karatsuba Algorithm. *IEEE Access*, 9, 110903–110915. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3101569>
25. Certik, J., Hankerson, D., & Menezes, A. (2003). High-speed software implementation of the NIST recommended elliptic curves over $GF(2^m)$. *IEEE Transactions on Computers*, 52(8), 1060–1070. <https://doi.org/10.1109/TC.2003.1223933>

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 18.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

О. А. МЕЛЬНИКОВА

кандидат технічних наук,
доцент кафедри безпеки інформаційних технологій
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0001-8843-9648

С. В. ГРАСМІК

студентка бакалаврату кафедри безпеки інформаційних технологій
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0008-5521-9831

СТАНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТОК КВАНТОВО-СТІЙКИХ КРИПТОГРАФІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У НІМЕЧЧИНІ

У статті досліджено сучасні підходи Німеччини до переходу на квантово-стійкі криптографічні технології в умовах зростання ризиків, пов'язаних з розвитком квантових обчислень. Розглянуто фактори, що зумовлюють необхідність відмови від класичних криптографічних алгоритмів, уразливих до квантових атак, та проаналізовано нормативні, технічні й організаційні кроки, які здійснює Федеральне відомство з безпеки інформаційних технологій Німеччини (BSI) для формування національної стратегії переходу.

Особливу увагу приділено криптографічним механізмам, які визначаються перспективними для довгострокового захисту, зокрема кодовим схемам, хеш-орієнтованим підписам та решітковим алгоритмам обміну ключами. Окреслено їхні ключові властивості, можливі сфери застосування та обмеження. Додатково розглянуто роль гібридних криптографічних конструкцій як проміжного інструмента забезпечення сумісності між класичними та постквантовими алгоритмами.

Проаналізовано готовність німецького ринку до впровадження квантово-стійких рішень, зокрема виклики, пов'язані з модернізацією апаратного забезпечення, складністю оновлення вбудованих систем та потребою у криптографічній гнучкості. Підкреслено значення міждержавної координації в межах Європейського Союзу та необхідність гармонізації стандартів для забезпечення узгодженого рівня безпеки.

Зроблено висновок, що Німеччина формує системний, стратегічно орієнтований підхід до впровадження постквантової криптографії, поєднуючи наукові дослідження, технічну стандартизацію та практичну взаємодію з промисловістю. Така модель демонструє ефективний приклад підготовки до майбутніх квантових загроз та може бути використана як основа для формування аналогічних стратегій в інших країнах.

Ключові слова: постквантова криптографія, квантові обчислення, квантові загрози, криптографічні стандарти, Classic McEliece, XMSS, SPHINCS+, ML-KEM, гібридні схеми, BSI, інформаційна безпека, критична інфраструктура.

О. А. MELNYKOVA

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Information Technology Security
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0001-8843-9648

S. V. HRASMIK

Bachelor's Student at the Department of Information Technology Security
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0008-5521-9831

FORMATION AND DEVELOPMENT OF QUANTUM-RESISTANT CRYPTOGRAPHIC TECHNOLOGIES IN GERMANY

The article examines modern approaches taken by Germany in its transition to quantum-resistant cryptographic technologies amid growing risks associated with the development of quantum computing. It considers the factors that necessitate abandoning classical cryptographic algorithms vulnerable to quantum attacks and analyzes the regulatory,

technical, and organizational steps undertaken by the Federal Office for Information Security of Germany (BSI) to form a national transition strategy.

Particular attention is given to cryptographic mechanisms considered promising for long-term protection, including code-based schemes, hash-based signatures, and lattice-based key exchange algorithms. Their key properties, potential areas of application, and limitations are outlined. Additionally, the role of hybrid cryptographic constructions as an intermediate tool for ensuring compatibility between classical and post-quantum algorithms is examined.

The readiness of the German market to implement quantum-resistant solutions is analyzed, including challenges related to hardware modernization, the complexity of updating embedded systems, and the need for cryptographic flexibility. The importance of interstate coordination within the European Union and the necessity of standard harmonization to ensure a consistent level of security are emphasized.

It is concluded that Germany is forming a systematic, strategically oriented approach to the implementation of post-quantum cryptography, combining scientific research, technical standardization, and practical cooperation with industry. This model demonstrates an effective example of preparing for future quantum threats and can serve as a foundation for developing similar strategies in other countries.

Key words: post-quantum cryptography, quantum computing, quantum threats, cryptographic standards, Classic McEliece, XMSS, SPHINCS+, ML-KEM, hybrid schemes, BSI, information security, critical infrastructure.

Постановка проблеми

Стрімкий розвиток квантових обчислень має вплив на уявлення довгострокової безпеки сьогоденних криптографічних систем.

Наразі криптографія з відкритим ключем широко використовується для захисту наших даних. Вона є одними із надійніших можливих варіантів на сьогоднішній день, але останні роки ведуться дослідження, які можуть привести до загрози – квантового комп'ютера, який буде здатний зламувати традиційні схеми, наприклад такі як RSA і ECC.

Квантові алгоритми ще не досягли промислової реалізації, але наявні оцінки ризиків на те, що продовження використання класичних криптографічних механізмів може призвести до створення вразливості для державних інформаційних систем, бізнесу, критичної інфраструктури. Особливо в небезпеці дані, що мають довгострокову цінність. “Захопи зараз – розшифруй потім” – принцип при якому інформацію перехоплюють та зберігають до можливості її розшифрування за допомогою квантових обчислювальних систем необхідної потужності.

Таким чином проблема полягає у необхідності переходу до криптографічних рішень, стійких до квантових атак, та у формуванні нормативної, технологічної і організаційної основи для цього переходу. Федеральне відомство з безпеки інформаційних технологій Німеччини визначає підготовку до переходу на нове покоління криптографічних стандартів як пріоритет державної політики, оскільки захист інформації має бути гарантований у перспективі десятиліть.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження у сфері постквантової криптографії охоплюють широкий спектр питань – від математичних основ криптографічних алгоритмів до аналізу стану квантових технологій, технологічних рекомендацій і стратегічних підходів до переходу на нові стандарти захисту інформації. Одним із фундаментальних напрямів є криптографія на основі решіток, якій приділяється значна увага в сучасних наукових роботах. У дослідженні аналізу решіткових задач, детально описано властивості задач LWE та SIS, обґрунтовуючи їх придатність як основи для стійких криптографічних механізмів, що не дає можливості їх зламати за допомогою квантових алгоритмів. [1]

В огляді розвитку квантових комп'ютерів зазначено, що хоча практичні машини, які здатні зламувати широко застосовані схеми, ще не створені, темпи розвитку вказують на потребу завчасної підготовки використання нових алгоритмів. [2] Більш стратегічне бачення цих ризиків представлено у документах, де визначено ключові напрями захисту від квантових загроз та сформовано базові принципи забезпечення криптографічної стійкості на майбутні роки. [3]

У низці технічних рекомендацій систематизовано параметри безпеки, придатні до практичного використання, наведено порівняння криптографічних схем та окреслено їхню ефективність залежно від застосування. Документи серії TR-02102 містять узагальнені вимоги до симетричних алгоритмів, хеш-функцій, цифрових підписів, а також рекомендації щодо параметрів до та після переходу на постквантові стандарти. [4-7]

Окрема частина досліджень стосується питань гібридних криптографічних конструкцій, які поєднують класичні та постквантові алгоритми. У технічних документах щодо цього методу описано можливість комбінування алгоритмів електронного підпису та обмінів ключів, що підвищує стійкість системи до невизначеностей, пов'язаних із подальшим розвитком криптоаналізу. [8]

У роботах, які орієнтовані на практичне впровадження, наголошується на можливості криптографічної гнучкості, яка дозволяє системам адаптуватися до майбутніх змін без значних технічних витрат. [9-10]

Інша сторона досліджень – готовність ринку до переходу на постквантові алгоритми. З опитувань та аналізу підкреслюється, що сфери з високими регуляторними вимогами, такі як фінанси, охорона здоров'я та телекомунікації, демонструють найбільшу зацікавленість у впровадженні нових стандартів. [11]

У спільних європейських документах підкреслюється важливість координації між державами та формування загальних підходів до вибору алгоритмів, вимог до їх впровадження та строки виконання. Такі документи створюють основу для формування єдиної криптографічної інфраструктури Європи та визначають роль національних установ у забезпеченні безпеки цифрового простору. [12]

Узагальнення цих робіт демонструє, що сучасні дослідження постквантової криптографії охоплюють як фундаментальні математичні аспекти, так і прикладні організаційні питання. Найважчий обсяг робіт показує комплексне уявлення про перспективні криптографічні алгоритми, потенційні ризики та вимоги до майбутньої інфраструктури захисту.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є аналіз підходів, які застосовуються у Німеччині для забезпечення криптографічної стійкості в умовах розвитку квантових обчислень. Дослідження спрямоване на визначення ключових аспектів та рекомендацій, що стосуються математичних основ квантово-стійких алгоритмів, аналізу підходів до впровадження гібридних криптографічних механізмів як перехідного етапу, розглянути участь Німеччини у формуванні стратегій постквантового захисту.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розвиток квантових технологій сформував новий клас криптографічних ризиків, пов'язаний з тим, що більшість існуючих алгоритмів базується на задачах, для яких ефективні квантові методи розв'язання. Математичний фундамент квантових атак давно встановлений: алгоритм Шора, який демонструє можливість поліноміального розв'язання задач факторизації цілих чисел і обчислення дискретного логарифма, використовуючи квантову суперпозицію та властивість періодичних функцій. Саме ці задачі є основою безпеки RSA, Diffie-Hellman та криптографії на еліптичних кривих, тому в довгостроковій перспективі вони не можуть вважатися надійними. Хоча практичні квантові комп'ютери ще не мають такої сили, сам факт їх існування є загрозою, що носить не гіпотетичний, а технологічно обґрунтований характер.

Існуючі квантові комп'ютери належать до класу NISQ-систем, що характеризується невеликою кількістю кубітів, високим рівнем шумів і значним обмеженням в реалізації складних квантових схем. Технологічні бар'єри, зокрема недостатня когерентність кубітів і складність корекції квантових помилок, залишаються ключовими факторами, що стримують створення криптографічно релевантних квантових комп'ютерів. Для реалізації атак на сучасні криптографічні системи необхідні тисячі логічних кубітів, підтриманих мільйонами фізичних кубітів. Такі масштаби поки є неможливими, однак світові тенденції – це активні інвестиції, розвиток промислових платформ, поява хмарного доступу до квантових систем – свідчать про швидке наближення наступних етапів. Також підкреслюється, що саме невизначеність у темпах розвитку технології робить завчасну підготовку до переходу необхідною.

Криптографічні механізми, рекомендовані для переходу Classic McEliece

Одним із ключових квантово-стійких механізмів, які BSI визначає пріоритетними для переходу на постквантові стандарти, є схема шифрування Classic McEliece, що належить до класу кодових криптосистем. Її стійкість базується на складності задач декодування лінійних кодів, що вважається надійною як проти класичних, так і проти квантових атак.

На відміну від більшості сучасних криптосистем, які спираються на дискретні логарифми або факторизацію, криптологія на основі кодів не піддається прискоренню за допомогою квантових алгоритмів. Саме це зробило McEliece одним із найстабільніших механізмів для довгострокового захисту криптографічних даних та інформаційних систем.

Схема Classic McEliece використовує побудову з приватним Горра-кодом та випадковим лінійним перетворенням, що маскує структуру цього коду у відкритий ключ. Криптосистема складається з генерації ключів, шифрування та розшифрування.

При генерації ключів формується приватний Горра-код із певним параметром розміру та ступенем полінома. Відкритий ключ утворюється як матриця генератора коду, замаскованого випадковими перестановками та лінійними перетвореннями.

На етапі шифрування повідомлення кодується за допомогою відкритого ключа з додаванням контрольованої кількості помилок.

При розшифруванні приватне знання структури Горра-коду дозволяє ефективно виправити помилки та відновити початкове повідомлення.

Перевагами даного механізму є насамперед довгострокова безпека, бо механізм зберігає стійкість до відомих на сьогоднішній день типів квантових атак. Також проблема декодування випадкових лінійних кодів все ще залишається достатньо складною.

Основним недоліком є розмір відкритих ключів, що ускладнює інтеграцію в мобільні або ресурсно-обмежені системи.

XMSS та SPHINCS+

Хеш-орієнтовані схеми цифрового підпису розглядаються у німецьких рекомендаціях як один із найбільш зрілих напрямів постквантової криптографії. Їхня безпека ґрунтується на властивостях криптографічних хеш-функцій, що дає змогу мінімізувати залежність від недостатньо досліджених математичних структур, характерних для інших PQC-підходів. У технічних документах BSI підкреслюється, що саме хеш-підписи демонструють найвищі рівні криптостійкості в умовах довготривалих квантових ризиків. Вони приділяють особливу увагу двом представникам цих механізмів – XMSS та SPHINCS+.

XMSS став одним із перших постквантових підписів, що отримав формальну стандартизацію та був рекомендований BSI задовго до завершення міжнародного конкурсу NIST. Його центральним принципом є використання дерев Меркла для організації великої кількості одноразових ключів. Кожен підпис базується у схемі на окремому ключі, а автентичність забезпечується шляхом побудови та перевірки шляху в дереві Меркла.

Ключовою особливістю цього механізму є те, що він вимагає ведення внутрішнього лічильника використаних ключів. Повторне застосування одного й того самого ключа призводить до критичної помилки, яка здатна компрометувати безпеку всієї схеми. Тому в технічних документах підкреслюється необхідність суворого контролю стану. Це є одним із недоліків цієї схеми, адже це ускладнює її використання у багатокористувацьких і високонавантажених системах.

Проте якщо у системах оновлення відбуваються рідко механізм може себе показати як надзвичайно ефективний і надійний. В німецьких рекомендаціях вказано, що він підходить для підписування прошивок та оновлень у критично важливих компонентах, автентифікації вбудованих пристроїв, середовищ, де кількість підписів обмежена і може бути точно спрогнозована.

Другим ключовим механізмом є SPHINCS+, який на відміну від XMSS не потребує відстеження стану ключів. Це усуває ризики помилок під час експлуатації і робить його набагато зручнішим для інтеграції в масштабовані інфраструктури, де ключі використовуються часто та багатьма незалежними сервісами.

BSI описує SPHINCS+ як “універсальну” схему підпису, що придатна для широкого спектра застосувань. Вона вважається перспективною для серверних систем із високою інтенсивністю підписів; хмарних сервісів; середовищ, де важлива масштабованість і автоматизація.

Проте BSI також вказує на певні недоліки, одними з яких є розмір підписів та відносно велика обчислювальна вартість.

ML-KEM

ML-KEM є гібридним модульно-решітковим механізмом шифрування ключів, чия безпека базується на задачі модульно навчання з помилками (MLWE). У німецькій системі технічних рекомендацій цей алгоритм займає особливе місце, оскільки поєднує високу криптографічну стійкість з ефективністю, необхідною для масштабного впровадження.

На відміну від класичних рішень, що не використовують алгебраїчної структури, ML-KEM забезпечує значно менші розміри ключів та високу швидкість обміну повідомленнями. Саме тому він розглядається як базовий механізм для захисту каналів зв'язку, побудови протоколів обміну ключами та оновлення існуючих стандартів шифрування. Ефективність алгоритму дозволяє застосовувати його як у високопродуктивних серверних середовищах, так і в ресурсно-обмежених пристроях.

Гібридні криптографічні схеми

Під час переходу до постквантової криптографії ключовими завданнями є забезпечення сумісності між існуючими класичними алгоритмами та новими квантово-стійкими механізмами. Оскільки перехід за один момент є технічно неможливим, BSI передбачають використання гібридних схем, у яких класичні алгоритми працюють з квантовими паралельно.

Одним із запропонованих гібридів є підписи ECDSA та SPHINCS+. Він поєднує класичний алгоритм еліптичних кривих із квантово-стійким хеш-підписом.

Перевагами такого поєднання є: зворотня сумісність та підвищений рівень безпеки. Перша вказує на те, що підписи можуть бути перевірені системами, що не підтримують постквантові алгоритми, а друга, що у разі прориву ECDSA квантовим комп'ютером, SPHINCS+ продовжить гарантувати автентичність повідомлення.

Напрямок переходу Німеччини на постквантову криптографію

Німеччина вибудовує перехід до квантово-стійких криптографічних механізмів як довгострокову державну стратегію, що охоплює нормативне регулювання, технічні стандарти, дослідницькі програми та співпрацю з промисловістю. Центральну роль у цьому процесі відіграє Федеральне відомство з безпеки інформаційних технологій, яке формує вимоги до криптографічних параметрів, визначає алгоритми, рекомендовані для використання, та здійснює координацію між державним сектором, виробниками обладнання і постачальниками цифрових послуг.

Одним із ключових напрямів є оцінювання готовності ринку до впровадження нових криптографічних стандартів. Проведене загальнонаціональне опитування стану криптографії та квантових обчислень засвідчило неоднорідний рівень підготовки німецьких організацій. Більшість компаній визнає необхідність переходу на

постквантові механізми, але лише незначна частина вже має практичні плани або реалізовані пілотні впровадження. Найбільшими перешкодами названо високі витрати міграції, значну складність модернізації криптографічних модулів та залежність від зовнішніх постачальників, які ще не інтегрували PQC у своє програмне забезпечення. Особливо проблемним виявилось питання оновлення вбудованих систем, промислової електроніки та IoT-пристроїв, де ресурси обчислення та пам'яті є обмеженими.

Паралельно зі збором ринкових даних Німеччина формує технологічну карту переходу. У стратегічних рекомендаціях визначено етапність впровадження нових криптографічних механізмів: спочатку впровадження гібридних схем у критичних компонентах, поступове оновлення протоколів у державних інформаційних системах, підвищення вимог до постачальників програмного забезпечення та модернізація інфраструктури керування ключами. Важливою складовою є забезпечення сумісності між старими та новими механізмами, щоб уникнути збоїв у сервісах, які мають високу залежність від безперервності роботи.

У внутрішній політиці особливе значення надається промисловості та сектору критичної інфраструктури. Для таких сфер, як енергетика, транспорт, телекомунікації та охорона здоров'я, рекомендується дострокове планування переходу через великий життєвий цикл обладнання. До того ж, німецькі технічні рекомендації відзначають необхідність створення криптографічно гнучких систем, здатних змінювати алгоритми без повної реконструкції апаратних або програмних компонентів.

Важливим елементом є інтеграція Німеччини у європейські ініціативи. Спільні заяви європейських установ, у яких Німеччина бере активну участь, спрямовані на узгодження стандартів, єдиних вимог до параметрів безпеки та підходів до впровадження PQC у державному секторі. Така гармонізація має забезпечити однаковий рівень захисту в усіх країнах ЄС та спростити транскордонну взаємодію цифрових сервісів.

У цілому, внутрішня криптографічна політика Німеччини формує збалансовану модель переходу: вона поєднує науково обґрунтовані рекомендації, детальні технічні стандарти, економічний аналіз готовності ринку та поступову еволюцію національної інфраструктури з урахуванням довгострокових загроз квантових технологій.

Висновки

Перехід до квантово-стійкої криптографії стає критично важливим елементом національної та європейської стратегії цифрової безпеки. Дослідження внутрішніх німецьких нормативів і технічних документів свідчить, що Німеччина вже сформувала комплексний підхід до впровадження нових криптографічних механізмів, який охоплює як наукові основи алгоритмів, так і практичні аспекти їх інтеграції у державні та комерційні системи.

Аналіз показує, що Німеччина приділяє особливу увагу механізмам, здатним забезпечити довготривалу безпеку, серед яких провідне місце займають кодові криптосистеми та хеш-підписи. Водночас визначено важливість перехідного періоду, протягом якого застосовуються гібридні криптографічні схеми, здатні гарантувати сумісність із чинними протоколами та поступовість оновлення інфраструктури. Наукова база, технічні стандарти та аналіз ризиків інтегровані у єдину систему, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо вибору алгоритмів та їх параметрів.

Внутрішній ринковий аналіз продемонстрував, що бізнес усвідомлює необхідність переходу, але стикається зі значними практичними бар'єрами. Це підкреслює важливість державної координації, що спрямована на зменшення економічних і технологічних ризиків для підприємств. Гармонізація національних стандартів з європейськими ініціативами додатково підсилює узгодженість політики безпеки та забезпечує рівномірну підготовку до появи квантових обчислювальних потужностей.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що Німеччина є одним із провідних європейських центрів у сфері переходу до постквантової криптографії. Системність підходів, орієнтація на довгострокову безпеку та тісна взаємодія між державою, наукою й промисловістю формують модель, яка може слугувати орієнтиром для інших країн у процесі підготовки до нової ери цифрових загроз.

Список використаної літератури

1. Buchmann J., Dahmen E., Hülsing A. (2017). Gitterbasierte Verfahren. Darmstadt: TU Darmstadt. URL: /mnt/data/Gitterbasierte_Verfahren.pdf
2. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2021). Entwicklungsstand Quantencomputer. Zusammenfassung V2.1. Bonn. URL: /mnt/data/Entwicklungsstand_QC_Zusammenfassung_V_2_1.pdf
3. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2022). Quantum-Sichere Kryptografie: Positionspapier. Bonn. URL: /mnt/data/Quantum_Positionspapier.pdf
4. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2025). BSI TR-02102-1: Cryptographic Mechanisms – Recommendations and Key Lengths. Bonn. URL: /mnt/data/BSI-TR-02102.pdf
5. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2025). BSI TR-02102-2: Cryptographic Mechanisms – Symmetric Mechanisms. Bonn. URL: /mnt/data/BSI-TR-02102-2.pdf
6. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2025). BSI TR-02102-3: Cryptographic Mechanisms – Hash Functions. Bonn. URL: /mnt/data/BSI-TR-02102-3.pdf

7. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2025). BSI TR-02102-4: Cryptographic Mechanisms – Digital Signatures. Bonn. URL: /mnt/data/BSI-TR-02102-4.pdf
8. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik.(2023). Kryptografie quantensicher gestalten. Bonn. URL: /mnt/data/Kryptografie-quantensicher-gestalten.pdf
9. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2023). BSI TR-03111: Hybrid Cryptographic Mechanisms. Bonn. URL: /mnt/data/BSI-TR-03111_V-2-1_pdf.pdf
10. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2020). Post-Quantum Cryptography: Recommendations for Action. Bonn. URL: /mnt/data/Post-Quanten-Kryptografie.pdf
11. KPMG & Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2023). Marktumfrage Kryptografie und Quantencomputing. Berlin. URL: /mnt/data/Marktumfrage_Kryptografie_Quantencomputing.pdf
12. European PQC Partnership. (2025). Joint Statement on the Transition to Post-Quantum Cryptography. URL: /mnt/data/PQC-joint-statement-2025.pdf

References

1. Buchmann, J., Dahmen, E., & Huelsing, A. (2017). *Gitterbasierte Verfahren* [Lattice-based methods]. Darmstadt: TU Darmstadt. [in German].
2. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2021). *Entwicklungsstand Quantencomputer. Zusammenfassung V2.1* [State of development of quantum computers. Summary V2.1]. Bonn. [in German].
3. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2022). *Quantum-Sichere Kryptografie: Positionspapier* [Quantum-secure cryptography: Position paper]. Bonn. [in German].
4. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2025). *BSI TR-02102-1: Cryptographic Mechanisms – Recommendations and Key Lengths*. Bonn. [in German].
5. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2025). *BSI TR-02102-2: Cryptographic Mechanisms – Symmetric Mechanisms*. Bonn. [in German].
6. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2025). *BSI TR-02102-3: Cryptographic Mechanisms – Hash Functions*. Bonn. [in German].
7. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2025). *BSI TR-02102-4: Cryptographic Mechanisms – Digital Signatures*. Bonn. [in German].
8. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2023). *Kryptografie quantensicher gestalten* [Designing quantum-secure cryptography]. Bonn. [in German].
9. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2023). *BSI TR-03111: Hybrid Cryptographic Mechanisms*. Bonn. [in German].
10. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2020). *Post-Quantum Cryptography: Recommendations for Action*. Bonn. [in German].
11. KPMG & Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2023). *Marktumfrage Kryptografie und Quantencomputing* [Market survey on cryptography and quantum computing]. Berlin. [in German].
12. European PQC Partnership. (2025). *Joint Statement on the Transition to Post-Quantum Cryptography*. [in English].

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

М. В. НОВОЖИЛОВА

доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Харківський національний університет міського господарства
імені О. М. Бекетова
ORCID: 0000-0002-9977-7375

О. І. ЧУБ

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
ORCID: 0000-0002-1216-856X

О. Б. КОСТЕНКО

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Харківський національний університет міського господарства
імені О. М. Бекетова
ORCID: 0000-0001-9744-4377

ПОБУДОВА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ БАГАТОВИМІРНОЇ ЗАДАЧІ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ З УРАХУВАННЯМ ЧАСОВОГО ВІКНА

Розглянуто багатопродуктову задачу розподілу скінченної множини ресурсів, що забезпечуються різними постачальниками, на скінченній множині пунктів призначення за умови наявності двобічних обмежень на час використання ресурсів – так званого часового вікна. Актуальність задачі розподілу ресурсів, що розглядається, обумовлюється надзвичайно широким спектром практичних застосувань як в класичній постановці, так і нових модифікаціях, запит на які постійно генерується динамічним зовнішнім середовищем. Проведено аналіз наукових літературних джерел, який показав, що основна увага при моделюванні приділяється врахуванню часу доставки ресурсів, тоді як значно менша кількість досліджень присвячена розв'язанню багатопродуктових задач розподілу ресурсів у визначеній постановці. Побудовано математичну модель задачі як багатовимірної оптимізаційної задачі геометричного проектування, тобто задачі оптимізаційного розміщення прямокутних об'єктів, що моделюють запити пунктів призначення, у багатовимірному просторі просторі ресурсів, який згенеровано сумарним запасом постачальників. Виявлено основні характеристики запропонованої математичної моделі, зокрема обґрунтовано властивість сепарабельності математичної постановки, що дозволило представити вихідну математичну модель в якості скінченного набору однопродуктових багатовимірних оптимізаційних розміщення прямокутних об'єктів в просторі ресурсів. Метою роботи є побудова математичної моделі та проведення на цій основі чисельного дослідження задачі розподілу ресурсів з урахуванням двобічних обмежень на час використання ресурсів. Методичне забезпечення оснований на властивості сепарабельності функції мети задачі ч, як наслідок, можливості подання похідних однопродуктових задач як оптимізаційних задач прямокутного розміщення. Визначено умови, за яких задача може не мати рішення, та запропоновано метод знаходження наближеного розв'язку задачі з оцінкою штрафу за порушення деяких обмежень часового вікна. Проведено реалізацію запропонованих інструментальних засобів основної задачі дослідження на основі створення програмного симулятора мовою C# із застосуванням візуального середовища проектування Visual Studio.

Ключові слова: математичне та комп'ютерне моделювання, оптимізаційна задача розподілу ресурсів, розміщення прямокутних об'єктів, геометричне проектування.

M. V. NOVOZHYLOVA

Doctor of Sci (Math), Professor,
Head of the Department of Computer Science and Information Technologies
O. M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy
ORCID: 0000-0002-9977-7375

O. I. CHUB

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Computer Sciences
and Information Technologies
V. N. Karazin Kharkiv National University
ORCID: 0000-0001-9744-4377

O. B. KOSTENKO

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Computer Science
and Information Technologies
O. M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy
ORCID: 0000-0001-9744-4377

MODELLING AND REALIZING A MULTIDIMENSIONAL RESOURCE ALLOCATION PROBLEM WITH TIME WINDOW CONSTRAINTS

The multi-product resource allocation problem is considered, involving the distribution of a finite set of resources, supplied by various vendors, to a finite set of destinations, subject to two-sided time window constraints on resource utilization. The relevance of the considered resource allocation problem is substantiated by an extremely wide range of practical applications, both in its classical formulation and in new modifications, which are constantly necessitated by the dynamic external environment. An analysis of scientific literature has shown that the primary focus in modeling is placed on accounting for resource delivery time, while a significantly smaller number of studies are dedicated to solving multi-product resource allocation problems in the specified formulation. A mathematical model of the problem is constructed as a multi-dimensional optimization problem of geometric programming, specifically, a problem of optimal placement of rectangular objects, which model the destination requests, in a multi-dimensional resource space generated by the total supply of the vendors.

The main characteristics of the proposed mathematical model were identified, including substantiating the property of separability of the mathematical formulation, which allowed the original mathematical model to be represented as a finite set of single-product multi-dimensional optimization problems of rectangular placement in the resource space. The goal of this work is to construct a mathematical model and, based on it, conduct a numerical study of the resource allocation problem considering two-sided constraints on resource utilization time. The methodical basis is grounded in the separability property of the objective function of the problem, and consequently, the possibility of representing the resulting single-product problems as optimal rectangular placement tasks. Conditions under which the problem may not have a solution are determined, and a method for finding an approximate solution to the problem is proposed, along with an assessment of the penalty for violating certain time window constraints. The proposed tools for the main research problem were implemented by creating a software simulator in C# using the visual studio visual design environment.

Key words: *mathematical and computer modeling, resource allocation optimization problem, placement of rectangular objects, geometric design.*

Постановка проблеми

Оптимальне використання виробничих потужностей і ресурсів для життєзабезпечення споживачів є однією з найгостріших проблем сучасності. Ця проблема набуває критичного значення, особливо в умовах ворожого зовнішнього середовища, надзвичайних ситуацій та військових операцій.

У практичній професійній діяльності, зокрема в логістиці, в реалізації хмарних обчислень, а також організації медичного обслуговування та постачання ліків, готельній справі, а також у транспортному, ремонтному обслуговуванні, у комунальному господарстві великих міст, сфері ритейлу, однією з ключових оптимізаційних задач є задача про розподіл ресурсів. Ця задача актуальна як у класичній постановці, так і у нових модифікаціях, що постійно генеруються реальними практичними запитами.

Теоретична та практична значущість цієї проблематики очевидна. При достатній кількості ресурсів задача, що розглядається, належить до теорії розкладів і є задачею про визначення допустимого розв'язку, можливо, не єдиного. У випадку, коли наявна кількість ресурсів є обмеженою і недостатньою для повного покриття запитів пунктів призначення, дана задача стає оптимізаційною. Але обидві постановки належать класу задач комбінаторної оптимізації і в загальному випадку є NP-складними, що обумовлює постійний науковий інтерес.

Об'єкт дослідження – процес розв'язання багатопродуктової задачі розподілу ресурсів в умовах змінного інтервалу постачання.

Предмет дослідження – оптимізаційний метод розв'язання багатопродуктової задачі розподілу ресурсів в умовах змінного інтервалу постачання як задачі прямокутного розміщення в просторі ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Різні підходи до розв'язання як детермінованих задач розподілу ресурсів, так і задач в умовах невизначеності, в однопродуктовій та багатопродуктовій постановках пропонуються в контексті різних галузей людської

активності в роботах [1 – 5] та інших. При цьому розглядаються суміжні класи задач, такі як транспортні задачі в різних постановках, задачі про призначення, задачі теорії розкладів, задачі планування навантажень, задачі про призначення, але і похідні класи задач, наприклад, задача балансування навантаження [6]. Різноманіття практичних постановок як імітаційних, так і оптимізаційних, призвело до появи цілого спектру методів розв'язання, таких, наприклад як: «Перший прийшов, перший обслуговується» (FCFS), «Min-Min», «Найкоротша робота першою» (Shortest Job First – SJF) тощо [1]. Ці методи мають низьку складність, що іноді призводить до низької продуктивності. Інші підходи використовують складніші методи м'яких обчислень, такі як: генетичний алгоритм, рій частинок та інші [4] з кращою продуктивністю. В якості частинних цільових функцій виступають загальна вартість та якість виконання робіт, число виконавців та час виконання робіт.

В роботі [6] для задачі балансування навантаження для хмарних обчислень запропоновано модифікований угорський метод, який в порівнянні з двома добре відомими методами «Min-Min», і FCFS доводить свою ефективність.

Цікавим результатом є формулювання задачі про призначення у нечіткій постановці [7].

В статті [8] досліджується проблема динамічного розподілу ресурсів для надання послуг на місцях у міських районах. Запити на послуги відбуваються спонтанно, поставки розподіляються динамічно. Реальні приклади таких застосувань включають відправку співробітників транспортної поліції на місця аварій і виїзд механіків на місця ремонтних робіт. Пропонується застосування так званого policy gradient підходу, за яким виконавці розподіляються за локаціями з метою мінімізації затримки.

Окреме місце займає підхід до розв'язання задач розподілу ресурсів оснований на ідеях оптимізаційного геометричного проектування, тобто реалізації можливості подання цієї задачі як задачі прямокутного розміщення в просторі ресурсів [9, 10]. Необхідно відмітити, що власне задача прямокутного розміщення також викликає науковий та практичний інтерес у дослідників [11].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є побудова математичної моделі та проведення на цій основі чисельного дослідження оптимізаційної багатопродуктової задачі розподілу ресурсів в умовах змінного інтервалу постачання з урахуванням властивості сепарабельності математичної моделі за ресурсами.

Для досягнення цієї мети в роботі необхідно розв'язати наступні задачі:

- Побудувати математичну модель задачі як в імітаційній, так і в оптимізаційній постановках та провести формальний опис процедури зведення багатопродуктової за постановкою задачі до набору однопродуктових оптимізаційних задач;
- Розробити метод розв'язання основної задачі дослідження як задачі прямокутного розміщення в просторі ресурсів;
- Розробити програмну реалізацію моделі та провести чисельні експерименти.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розглянемо задачу у багатопродуктовій постановці як задачу постачання скінченного набору ресурсів на множині постачальників та пунктів призначення. Отже, вихідними екзогенними параметрами задачі є множина $\Theta = \{\theta_i\}, i=1, \dots, I$ пунктів призначення та множина $\Xi = \{\omega_j\}, j=1, \dots, J$, постачальників, в загальному випадку $I \neq J$.

Також є набір $W = \{w_1, w_2, \dots, w_N\}$ ресурсів, які необхідно доставити від постачальників до пунктів призначення на визначеному інтервалі часу $[0, T]$, що є горизонтом планування.

Кожен з постачальників $\{\omega_j\}, j=1, \dots, J$, має вектор запасу $W_j = \{w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{Nj}\}$, протягом часу $T_j = \{T_{1j}, T_{2j}, \dots, T_{Nj}\}$, де величини w_{nj} задовольняють умови $0 \leq w_{nj} \leq W_{n_max}$. Таким чином, сумарна оцінка запасу n -го продукту складає

$$W_n = \sum_{j=1}^J w_{nj}, n=1, 2, \dots, N.$$

У свою чергу, кожен пункт призначення $\{\theta_i\}, i=1, \dots, I$ характеризується вектором попиту на ресурси $D_i = \{d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{iN}\}$, де кожна з оцінок d_{in} задовольняє умови $0 \leq d_{in} \leq D_{i_max}$. Отже, сумарна оцінка попиту n -го продукту складає

$$D_n = \sum_{i=1}^I d_{in}, n=1, 2, \dots, N.$$

До того ж кожен пункт призначення $\{\theta_i\}, i=1, \dots, I$ має отримати ресурс w_n на визначений інтервал часу t_{in} , причому часове вікно $[t_{in_min}, t_{in_max}]$ може бути більшим за інтервал t_{in} ,

$$(t_{in_max} - t_{in_min}) \geq t_{in}, t_{in_min} \in [0, T]. \quad (1)$$

Позначимо через $x_{ijn} \geq 0$ кількість ресурсів n -го типу від j -го постачальника до i -го пункту призначення, який надходить в момент часу τ .

Необхідно визначити такий розподіл $X = \{x_{111}, \dots, x_{ijn}, \dots, x_{I t_{in_max} N}\}$ ресурсів від постачальників до пунктів призначення так, щоб задовольнити потреби останніх:

$$\forall n \in 1, 2, \dots, N; \forall i \in 1, 2, \dots, I \sum_{\tau=t_{in_min}}^{t_{in_max}} \sum_{j=1}^J x_{ijn} \leq d_{in}, \tag{2}$$

зважаючи на обмеження щодо кількості наявних ресурсів постачальників

$$\forall n \in 1, 2, \dots, N; \forall j \in 1, 2, \dots, J \sum_{\tau=t_{jn_min}}^{t_{jn_max}} \sum_{i=1}^I x_{ijn} \leq w_{nj}. \tag{3}$$

За виконання обмежень $W_n \geq D_n, n=1, 2, \dots, N$, задача стає задачею про визначення допустимого розв'язку. В протилежному випадку в якості цільової функції $F(X)$ можна розглядати функцію вигляду $F(X) = I_{placed}(X)$:

$$I_{placed}(X) \rightarrow \max, \tag{4}$$

де $I_{placed} \leq I$ – це кількість обслужених пунктів призначення.

Зауваження 1. Судячи з вигляду обмежень (2), (3), задача дослідження очевидно припускає декомпозицію на N незалежних однопродуктових задач розподілу окремих ресурсів за переліком $W = \{w_1, w_2, \dots, w_N\}$.

Тому надалі без втрати загальності розглянемо одну таку задачу, наприклад розподілу ресурсу w_n (один зріз у N -вимірному просторі ресурсів) та опустимо індекс n .

Тоді кожен запит d_i від i -го пункту постачання може бути представлений в якості прямокутника розмірів (d_i, t_i) , який потрібно розмістити у замкненій допустимій області S простору ресурсів, що формується як об'єднання прямокутників (w, T) . Положення прямокутника (d_i, t_i) області S задається вектором (τ, υ) параметрів розміщення, який пов'язаний з лівим нижнім кутом прямокутника (рис. 1).

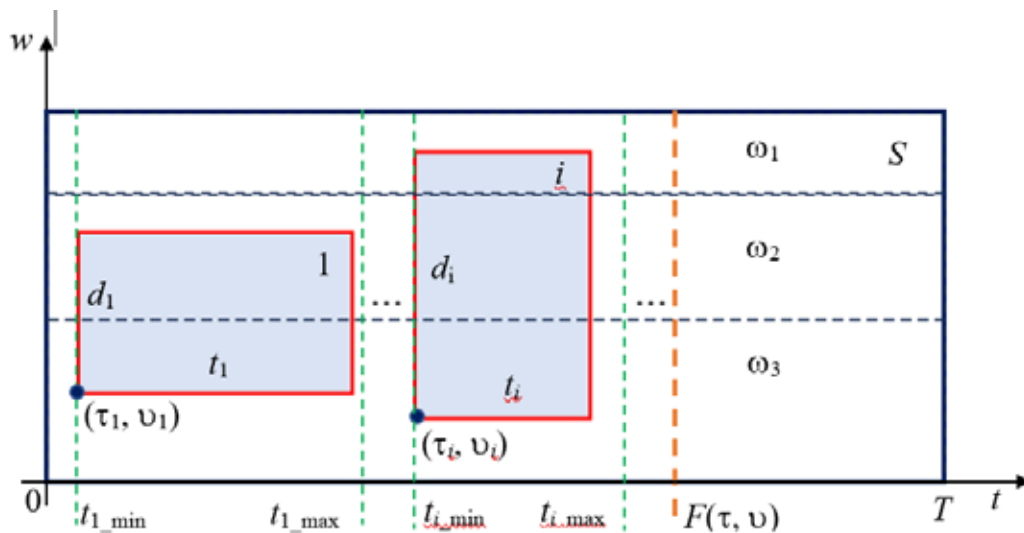


Рис. 1. Розміщення запитів пунктів призначення в допустимій області ресурсів $S = \omega_1 \cup \omega_2 \cup \omega_3$

Зауваження 2. Функція цілі (4) припускає еквівалентну заміну функцією цілі вигляду

$$\min \max_{i=1, 2, \dots, I} (\tau_i + t_i).$$

Тоді математична модель задачі розподілу ресурсів як задачі розміщення подається у вигляді:

$$\min \max_{i=1, 2, \dots, I} (\tau_i + t_i) \tag{5}$$

$$(\tau_i + t_i \leq \tau_j \vee \tau_j + t_j \leq t_i) \tag{6}$$

$$\forall (\omega_i + d_i \leq \omega_j \vee \omega_j + d_j \leq \omega_i); \tag{7}$$

$$t_{i_min} \leq \tau_i \leq t_{i_max} \tag{8}$$

$$\omega_i \leq W - d_i; \tag{9}$$

$$\tau_i, d_i \geq 0, i, j = 1, 2, \dots, I, i \neq j.$$

Задача (5-9) є задачею дослідження операцій з нелінійною функцією цілі (5) та множиною обмежень, упорядкованих в структуру (6-9).

Обмеження (7) задають вигляд часового вікна. Зазначимо, що ці обмеження можуть перетворювати область допустимих значень задачі на порожню множину, тому пропонується такий ітераційний підхід до розв'язання задачі (5-9).

1. Генерація переставлення Π_k номерів об'єктів розміщення з урахуванням логіки обмеження (8).
2. Розв'язання редукованої задачі розміщення, де обмеження (8) надається в ослабленій формі (тільки ліва частина нерівності (8)):

$$(t_{i_min} \leq \tau_i),$$

визначення вектору оптимальних значень параметрів розміщення

$$(\tau_{red}^*, d_{red}^*).$$

3. Перевірка виконання правосторонніх обмежень ($\tau_{red_j}^* \leq t_{i_max}$). Визначення величини невід'язки P_k , тобто штрафу

$$P_k = \sum_{i=1}^I \min(t_{i_max} - \tau_{red_i}^*, 0)$$

Кроки 1-3 можуть повторюватися скінчену кількість разів на різних переставленнях. Оптимальним є розв'язок, на якому досягається $\max P_k$.

Програмну реалізацію здійснено мовою програмування C# у середовищі проектування Visual Studio.

Проведені чисельні експерименти з кількістю об'єктів розміщення $I \leq 40$ на згенерованій множині 1000 переставлень Π_k . Час виконання складав менше 5 с. На рис. 2. наведено приклад розв'язку задачі редукованої задачі розміщення 20 об'єктів за умови $t_{i_min} = 0, i=1,2,\dots,I$.

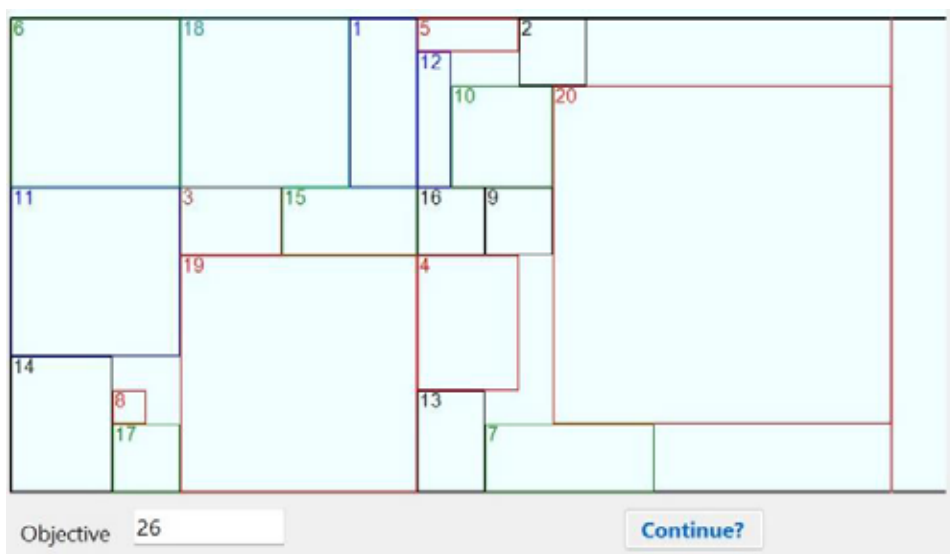


Рис. 2. Розв'язок редукованої задачі розміщення 20 об'єктів

На рис. 3 наведено приклад розв'язку тієї ж задачі з урахуванням умови $(t_{i_min} \leq \tau_i), i=1,2,\dots,I$.

Висновки

В результаті проведеного дослідження побудовано інструментальні засоби моделювання та розв'язання задачі розподілу ресурсів з урахуванням часового вікна як багатовимірної оптимізаційної задачі геометричного проектування. Проведено програмну реалізацію запропонованого методу на основі створення програмного симулятора мовою C# із застосуванням візуального середовища проектування Visual Studio. Проведені чисельні експерименти на множинах наборів вхідних даних показали, що запропоновані конструктивні засоби математичного моделювання та створене інформаційне середовище є гнучкою методологією дослідження інших типів оптимізаційних задач розподілу ресурсів.

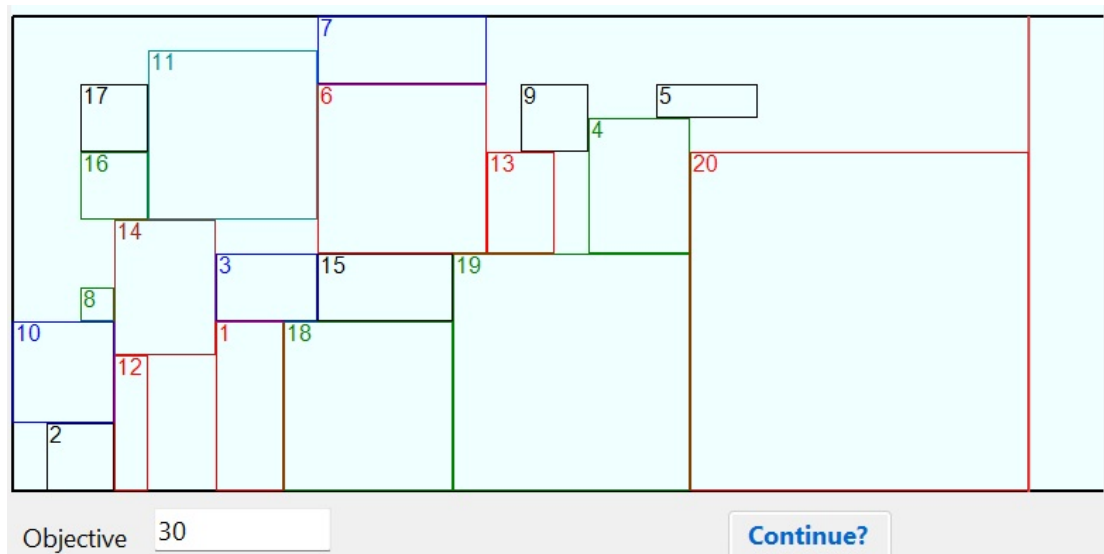


Рис. 3. Розв'язок задачі розміщення 20 об'єктів з урахуванням умови ($t_{i_{\min}} \leq \tau_i$).

Список використаної літератури

1. Ibraheem A. K. An effective load balancing algorithm based on deadline constraint under cloud computing. *2nd International Scientific Conference of Al-Ayen University (ISCAU-2020), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 928, 032070. DOI: 10.1088/1757-899X/928/3/032070
2. Babu K. R. R. Samuel Ph., Enhanced Bee Colony Algorithm for Efficient Load Balancing and Scheduling in Cloud. *Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications (IBICA 2015), Proceedings of the 6th International Conference*. 2015, 588p., pp. 67–78.
3. Mills-Tettey G.A., Stentz A., Dias M.B. The Dynamic Hungarian Algorithm for the Assignment Problem with Changing Costs. *Naval Research Logistics Quarterly*. № July. 2007. Pp.83–87.
4. Sultana F., Nizam M. An Alternative Proposed Method for Solution of Assignment Problem. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research* Vol. 52(1). 2020. Pp. 40–50.
5. Saroit I. A., Tarek D. LBCC-Hung: A load balancing protocol for cloud computing based on Hungarian method. *Egyptian Informatics Journal*. № 24. 2023. 100387. DOI:10.1016/j.eij.2023.100387
6. Song M., Cheng L. Solving the Reliability-Oriented Generalized Assignment Problem by Lagrangian Relaxation and Alternating Direction Method of Multipliers. *Expert Systems with Applications*. Vol. 205. 2022. 117644. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.117644
7. Acar E. H. S., Aplak A. Model Proposal for a Multi-Objective and Multi-Criteria Vehicle Assignment Problem: An Application for a Security Organization. *Mathematical and Computational Applications*. Vol. 21(4). 2016. Pp. 39-47. DOI: 10.3390/mca21040039
8. Kwak Yo, Deal B. Multi-Scaled Green Infrastructure Optimization: Spatial Projections and Assessment for Dynamic Planning and Design. *Landscape and Urban Planning*. Vol. 249. 2024. 105128. DOI:10.1016/j.landurbplan.2024.105128
9. Chub I.A., Novozhylova M.V., Murin M.N. Optimization problem of allocating limited project resources with separable constraints. *Cybernetics and Systems Analysis*. Vol. 49(4). 2013. Pp. 632–642. DOI: 10.1007/s10559-013-9550-z
10. Novozhylova M.V., Karpenko M. Yu. Solution of a Multicriteria Assignment Problem Using a Categorical Efficiency Criterion. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. № 4. 2024. Pp. 75-84. DOI: 10.15588/1607-3274-2024-4-7
11. Бугаєва І. Г. Аналіз параметрів генетичного алгоритму розв'язання двовимірної задачі упакування. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Т. 2. 2025. № 2(93). С. 53-59. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.6

References

1. Ibraheem A. K. (2020) An effective load balancing algorithm based on deadline constraint under cloud computing. *2nd International Scientific Conference of Al-Ayen University (ISCAU-2020), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. vol. 928, 032070. DOI: 10.1088/1757-899X/928/3/032070
2. Babu K. R. R., Samuel Ph. (2015) Enhanced Bee Colony Algorithm for Efficient Load Balancing and Scheduling in Cloud. *Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications (IBICA 2015), Proceedings of the 6th International Conference*. 588p., pp. 67–78.

3. Mills-Tettey G.A., Stentz A., Dias M.B. (2007) The Dynamic Hungarian Algorithm for the Assignment Problem with Changing Costs. *Naval Research Logistics Quarterly*. № July. Pp.83–87.
4. Sultana F., Nizam M. (2020) An Alternative Proposed Method for Solution of Assignment Problem. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research* Vol. 52(1). Pp. 40–50.
5. Saroit I. A., Tarek D. (2023) LBCC-Hung: A load balancing protocol for cloud computing based on Hungarian method. *Egyptian Informatics Journal*. № 24. 100387. DOI:10.1016/j.eij.2023.100387
6. Song M., Cheng L. (2022) Solving the Reliability-Oriented Generalized Assignment Problem by Lagrangian Relaxation and Alternating Direction Method of Multipliers. *Expert Systems with Applications*. Vol. 205. 117644. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.117644
7. Acar E. H. S., Aplak A. (2016) Model Proposal for a Multi-Objective and Multi-Criteria Vehicle Assignment Problem: An Application for a Security Organization. *Mathematical and Computational Applications*. Vol. 21(4). Pp. 39-47. DOI: 10.3390/mca21040039
8. Kwak Yo, Deal B. (2024) Multi-Scaled Green Infrastructure Optimization: Spatial Projections and Assessment for Dynamic Planning and Design. *Landscape and Urban Planning*. Vol. 249. 105128. DOI:10.1016/j.landurbplan.2024.105128
9. Chub I.A., Novozhylova M.V., Murin M.N. (2013) Optimization problem of allocating limited project resources with separable constraints. *Cybernetics and Systems Analysis*. Vol. 49(4). Pp. 632 – 642. DOI: 10.1007/s10559-013-9550-z
10. Novozhylova M.V., Karpenko M.Yu. (2024) Solution of a Multicriteria Assignment Problem Using a Categorical Efficiency Criterion. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. № 4. Pp. 75-84. DOI: 10.15588/1607-3274-2024-4-7
11. I. H. Buhaieva (2025) Analiz parametriv henetychnoho alhorytmu rozviazannia dvovymirnoi zadachi upakovky [Analysis of parameters of genetic algorithm for solving two-dimensional packing problem]. *Visnyk of Kherson National Technical University*. Vol. 2. № 2(93). P. 53-59. [in Ukrainian]. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.6

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

А. О. ОНИЩЕНКО

аспірант кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Харківський національний університет міського господарства
імені О. М. Бекетова
ORCID: 0009-0005-6721-5350

Б. П. БОЧАРОВ

кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Харківський національний університет міського господарства
імені О. М. Бекетова
ORCID: 0000-0002-5324-6851

О. Б. КОСТЕНКО

кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Харківський національний університет міського господарства
імені О. М. Бекетова
ORCID: 0000-0001-9744-4377

ГІБРИДНА МОДЕЛЬ MCDM ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ ПОШУКОВОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Метою дослідження є розроблення інтегрованої моделі підтримки прийняття рішень у сфері пошукової оптимізації (SEO) із використанням гібридного підходу, що поєднує методи DEMATEL, DANP та VIKOR. Така модель дозволяє комплексно оцінювати взаємозв'язки між технічними, контентними та поведінковими факторами оптимізації, визначити їх системну роль та формувати обґрунтовані управлінські рішення в умовах зростаючої складності алгоритмів пошукових систем. На відміну від лінійних та ієрархічних методів оцінювання, запропонований підхід враховує міжкритеріальні залежності та причинно-наслідкові впливи, що робить його особливо придатним для аналізу сучасних SEO-процесів.

У межах емпіричного дослідження проаналізовано групу вебресурсів технологічного сектору, для яких було сформовано експертні оцінки за вісьмома ключовими критеріями: якість контенту, семантичне ядро (ключові слова), швидкість завантаження сторінок, структура сайту, мобільна адаптивність, профіль зворотних посилань, поведінкові та технічні фактори. Метод DEMATEL дав змогу побудувати матрицю причинно-наслідкових впливів і визначити домінуючі критерії, серед яких провідну роль відіграють структура сайту та швидкість завантаження. Подальше застосування методу DANP забезпечило обчислення інтегральних ваг критеріїв, що відображають їхню відносну важливість у мережі взаємозалежностей. На завершальному етапі метод VIKOR був використаний для компромісного ранжування вебресурсів та визначення сайтів із найбільш збалансованими параметрами.

Отримані результати підтверджують ефективність гібридної MCDM-моделі для формування стратегічних SEO-рішень, оптимізації ресурсів, виявлення «вузьких місць» та підвищення релевантності вебресурсів у пошуковій видачі. Запропонований підхід може бути корисним для фахівців із оптимізації, маркетингологів і аналітиків, які потребують кількісного, системного та прозорого методу оцінювання якості оптимізації.

Ключові слова: пошукова оптимізація, SEO, DEMATEL, DANP, VIKOR, вебаналітика, релевантність, зворотні посилання, ключові слова, цифровий маркетинг.

А. О. ONYSHCHENKO

Postgraduate Student at the Department of Computer Science
and Information Technologies
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
ORCID: 0009-0005-6721-5350

B. P. BOCHAROV

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Computer Science
and Information TechnologiesO. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
ORCID: 0000-0002-5324-6851

O. B. KOSTENKO

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Computer Science
and Information TechnologiesO. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
ORCID: 0000-0001-9744-4377

A HYBRID MCDM MODEL FOR THE INTELLIGENT ENHANCEMENT OF SEARCH ENGINE OPTIMIZATION

The objective of the study is to develop an integrated decision-support model for search engine optimization (SEO) based on a hybrid multi-criteria approach combining the DEMATEL, DANP, and VIKOR methods. The proposed framework enables a comprehensive evaluation of the interdependencies among technical, content-related, and behavioral SEO factors, identification of their systemic roles, and formulation of well-grounded optimization decisions in the context of increasingly complex search engine algorithms. Unlike classical linear or hierarchical evaluation approaches, this model considers causal relationships and inter-criteria dependencies, making it particularly suitable for analyzing modern SEO environments.

Within the empirical investigation, a group of technology-sector websites was analyzed based on expert evaluations across eight key criteria: content quality, keyword semantics, page loading speed, site structure, mobile responsiveness, backlink profile strength, user behavior signals, and technical SEO. The DEMATEL method was employed to construct a causal-effect influence matrix and identify dominant criteria, with site structure and loading speed demonstrating the strongest causal impact. Subsequently, the DANP method enabled the calculation of global criteria weights that reflect their relative importance within the network of mutual influences. At the final stage, the VIKOR method was applied to perform compromise-based ranking of the evaluated websites and to determine those with the most balanced SEO performance.

The findings demonstrate the effectiveness of the hybrid MCDM model for supporting strategic SEO decision-making, optimizing resource allocation, identifying systemic bottlenecks, and enhancing the relevance and visibility of web resources in search engine results. The proposed approach can serve as a quantitative, transparent, and analytically robust tool for SEO specialists, digital marketers, and analysts involved in evaluating and improving website optimization strategies.

Key words: search engine optimization, SEO, DEMATEL, DANP, VIKOR, web analytics, relevance, backlinks, keywords, digital marketing.

Постановка проблеми

У сучасній цифровій економіці ефективна присутність у пошукових системах є вирішальним фактором конкурентоспроможності бізнесу, незалежно від галузі. Пошукова оптимізація (Search Engine Optimization) перетворилася зі статичної техніки налаштування вебсайтів на складний процес, що поєднує технічну архітектуру, контентну релевантність, поведінкові фактори користувачів і зовнішні сигнали авторитетності. Умови високої конкуренції в інформаційному середовищі та постійна еволюція пошукових алгоритмів вимагають від фахівців більш глибокого аналітичного підходу до SEO-стратегій.

Класичні методи SEO-аналітики, які ґрунтуються на евристичних підходах або лінійній ваговій оцінці критеріїв, виявляються недостатніми для повного врахування складної структури взаємозв'язків між факторами оптимізації. Зокрема, вони не враховують зворотні зв'язки, залежності між критеріями, а також вплив поведінкових та соціальних сигналів на загальну ефективність просування. Крім того, складність пошукових систем, як-от Google, дедалі більше базується на алгоритмах штучного інтелекту, що ускладнює передбачення результатів оптимізації за допомогою традиційних підходів.

У зв'язку з цим виникає потреба у використанні гібридних моделей багатокритеріального прийняття рішень (MCDM), які здатні не лише ідентифікувати впливові фактори, але й враховувати їхню взаємозалежність, а також дозволяють здійснювати порівняння альтернатив з урахуванням компромісів. Методологічна інтеграція DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory), DANP (DEMATEL-based Analytic Network Process) та VIKOR відкриває нові можливості для побудови інструментів оцінки й оптимізації SEO-стратегій на обґрунтованій основі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Упродовж останніх десятиліть пошукова оптимізація набула надзвичайної ваги в теорії та практиці цифрового маркетингу. Вона охоплює широкий спектр заходів від технічної оптимізації структури сайту до стратегічного управління контентом, зворотними посиланнями та поведінковими сигналами користувачів. Проте у світлі

ускладнення пошукових алгоритмів, зокрема впровадження штучного інтелекту, традиційні методи аналізу SEO-факторів дедалі частіше втрачають ефективність [1].

Базові дослідження у сфері SEO переважно зосереджувались на ідентифікації окремих факторів впливу на ранжування (наприклад, частота ключових слів, кількість зворотних посилань, наявність мета-даних) [2][3]. Одним із ключових проривів стала модель PageRank, що розглядала гіперпосилання як індикатор авторитетності сторінки [4]. Подальші оновлення алгоритмів Google Panda і Penguin зосередилися на якості контенту та боротьбі зі спам-посиланнями, водночас посилюючи роль поведінкових факторів [5].

Попри суттєвий внесок цих підходів у розуміння принципів пошукової видачі, наукова критика наголошує на їхніх обмеженнях. Зокрема, класичні методи припускають незалежність між критеріями SEO, тоді як у реальному цифровому середовищі чинники є взаємопов'язаними та динамічними [6].

Для подолання цих обмежень у літературі з'являються пропозиції щодо застосування багатокритеріальних моделей прийняття рішень (MCDM). Модель DEMATEL дозволяє дослідити причинно-наслідкові зв'язки між критеріями, будуючи матрицю впливів. На її основі модель DANP (DEMATEL-based Analytic Network Process) дозволяє обчислити ваги залежних критеріїв у складній мережі впливів [7]. Зі свого боку, метод VIKOR використовується для знаходження компромісного рішення за наявності множинних альтернатив із суперечливими критеріями [8].

Окрему увагу привертають роботи, що поєднують ці методи в гібридні моделі для вирішення складних прикладних завдань. Зокрема, у роботі Huang et al. (2020) було реалізовано гібридну модель DEMATEL-DANP-VIKOR для оцінки SEO-факторів технокомпаній, що дозволило встановити найбільш критичні зони покращення (наприклад, мета-теги, ключові слова, сайт-гайди) [9].

Таким чином, наявна наукова база демонструє актуальність інтегрованих MCDM-підходів як ефективного інструменту аналізу, планування та вдосконалення SEO-стратегій у висококонкурентному цифровому середовищі.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є формалізація процесу ранжування SEO-факторів із урахуванням міжкритеріальних взаємозв'язків та компромісного аналізу альтернатив. Для досягнення цієї мети побудовано гібридну MCDM-модель, яка дозволяє виявити ключові чинники впливу, обчислити їх ваги та визначити пріоритети оптимізації на прикладі реальних вебресурсів у технологічному секторі. Таким чином, подальше дослідження спрямовано на розроблення інтегрованої MCDM-моделі, що комплексно відображає взаємозв'язки між SEO-факторами та визначає оптимальні напрями їх вдосконалення.

З метою формалізації процесу оцінки та пріоритезації SEO-факторів у межах даного дослідження запропоновано використання інтегрованого підходу на основі методів DEMATEL, DANP та VIKOR, які є складовими сучасного арсеналу багатокритеріального прийняття рішень (MCDM).

Викладення основного матеріалу дослідження

У цифровому середовищі SEO-фактори характеризуються високим ступенем взаємозалежності: зміни у швидкості завантаження сторінки можуть впливати на показники відмов, які, у свою чергу, впливають на поведінкові сигнали та ранжування. Для моделювання таких взаємозв'язків було обрано метод DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory), який дозволяє побудувати матрицю причинно-наслідкових впливів між критеріями.

Отримані дані використовуються у модифікованому методі DANP (DEMATEL-based Analytic Network Process), що дозволяє визначити глобальні ваги критеріїв, враховуючи взаємозалежності між ними. Це дає змогу уникнути спотворень, притаманних ієрархічним моделям на кшталт АНР, у випадку наявності зворотних зв'язків між факторами.

Остаточне ранжування SEO-альтернатив здійснюється за допомогою методу VIKOR, який дозволяє визначити компромісне рішення, максимально наближене до ідеального варіанту, з урахуванням як максимального виграшу, так і мінімального ризику невідповідності.

На основі аналізу актуальної літератури та експертних інтерв'ю з SEO-спеціалістами були сформовані такі критерії:

- K1 – Якість контенту
- K2 – Семантичне ядро (ключові слова)
- K3 – Швидкість завантаження сторінок
- K4 – Структура сайту
- K5 – Мобільна адаптивність
- K6 – Backlink-профіль
- K7 – Поведінкові фактори
- K8 – Індексція та технічне SEO

Після побудови матриці впливів за DEMATEL було отримано граф (див. рис. 1), який демонструє сильні причинно-наслідкові зв'язки між швидкістю, поведінковими факторами та структурою сайту.

Методика була апробована на прикладі групи сайтів малого бізнесу з різних доменних зон (комерційні сайти, блогіві платформи, лендинги), що мають приблизно однаковий розмір та тематику. Збір SEO-метрик здійснювався з використанням Google Search Console, Ahrefs, PageSpeed Insights та Screaming Frog.

Застосування моделі дозволило:

- виявити фактори з найбільшим прямим та опосередкованим впливом (структура сайту, швидкість, ключові слова),
- визначити відносні ваги кожного критерію за DANP,
- ранжувати сайти за якістю SEO з урахуванням компромісних стратегій за VIKOR.

Результати дослідження

На основі побудованої моделі було отримано такі ключові результати:

Матриця впливу DEMATEL. У процесі експертного оцінювання впливів між факторами була сформована початкова матриця прямого впливу, нормалізована та використана для побудови повної впливової матриці. На її основі визначено:

- Критерій-джерела впливу (causal group): K3 (Швидкість завантаження), K4 (Структура сайту)
- Критерій-результати (effect group): K7 (Поведінкові фактори), K8 (Індексація)

Сумарний результат показує, що структура сайту (K4) має найвищу сукупну причинну дію, тоді як поведінкові фактори (K7) найсильніший отримувач впливу.

Графова модель DEMATEL, представлена на рис. 1, ілюструє комплексні взаємовпливи між технічними параметрами, контентом, лінкуванням, соціальними сигналами та UX-компонентами. Як видно зі схеми, доміnantними є фактори, що виконують причинну роль, тоді як інші групи виступають здебільшого отримувачами впливів, формуючи системну конфігурацію SEO-процесу.

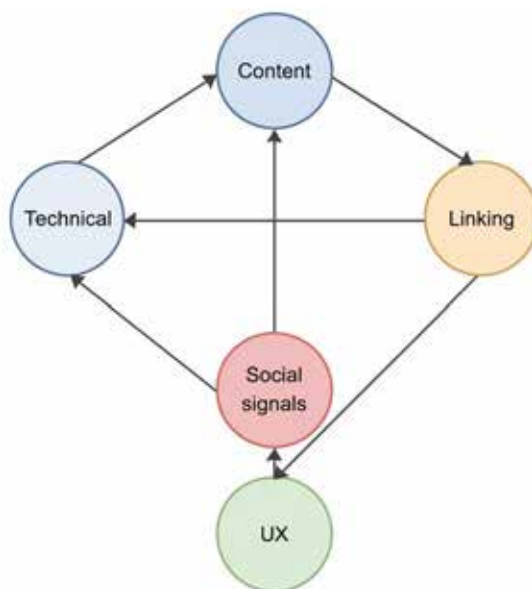


Рис. 1. Графова модель взаємовпливів SEO-факторів (DEMATEL)

Глобальні ваги критеріїв за DANP. Метод DANP дозволив розрахувати інтегральні ваги з урахуванням як прямих, так і непрямих зв'язків. Результати наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Глобальні вагові коефіцієнти критеріїв у моделі DANP

Критерій	Вага (%)
K1 – Якість контенту	17.8
K2 – Ключові слова	15.2
K3 – Швидкість завантаження	14.9
K4 – Структура сайту	18.5
K5 – Мобільна адаптивність	8.3
K6 – Backlink-профіль	10.6
K7 – Поведінкові фактори	9.7
K8 – Індексація/технічне SEO	5.0

Найбільші ваги отримали структура сайту, якість контенту та ключові слова, що підтверджує гіпотезу про їхню критичну важливість для успішної SEO-стратегії.

Ранжування альтернатив за методом VIKOR. Було проаналізовано 6 сайтів (A–F), для кожного з яких зібрані значення SEO-метрик. На основі ваг з DANP застосовано VIKOR для пошуку компромісного рішення. Результати представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Q-індекс та ранги сайтів за методом VIKOR

Сайт	Q-індекс (VIKOR)	Ранг
A	0.155	1
B	0.204	2
C	0.311	3
D	0.485	4
E	0.622	5
F	0.751	6

Сайт А показав найкращу збалансованість між усіма показниками і визначений як найбільш оптимальний з точки зору SEO-пріоритетів.

Результати, отримані внаслідок застосування гібридної MCDM-моделі, дозволяють сформулювати низку теоретичних узагальнень і практичних висновків щодо стратегічного

Застосування DEMATEL у поєднанні з DANP забезпечило глибше розуміння внутрішньої структури взаємозв'язків між SEO-факторами. Методика дозволила не лише визначити вагу кожного критерію, а й врахувати його системну роль – як джерела або отримувача впливу. Це суттєво підвищує якість стратегічного планування, оскільки дозволяє фокусувати ресурси не лише на найважливіших, але й на найбільш впливових факторах.

Метод VIKOR, у свою чергу, забезпечив ефективне компромісне ранжування альтернатив (сайтів) на основі множини взаємопов'язаних метрик. Це дозволяє обґрунтовано визначати SEO-лідерів і зони для вдосконалення з урахуванням як ідеального, так і антиідеального рішень.

Для SEO-команд і аналітиків результати цього дослідження дають можливість:

- сформувати пріоритетну послідовність дій в межах SEO-кампаній;
- розробити KPI, що ґрунтуються не лише на емпіричних даних, а й на кількісній моделі впливу;
- виявити потенційні «вузькі місця» у стратегії оптимізації (наприклад, слабку структуру сайту чи проблеми з індексацією), які мають опосередкований негативний вплив на інші метрики.

На відміну від традиційних евристичних методів SEO-аналізу, які базуються переважно на досвіді або інтуїції, запропонований підхід надає формалізований інструментарій для підтримки прийняття рішень. Крім того, модель дозволяє врахувати динамічну природу SEO-факторів та еволюцію алгоритмів пошукових систем, що є ключовим у сучасному конкурентному середовищі.

Висновки

У межах дослідження було розроблено та апробовано гібридну модель багатокритеріального прийняття рішень для оцінки ефективності SEO-стратегій, яка поєднує методи DEMATEL, DANP та VIKOR. Запропонований підхід дозволив комплексно враховувати взаємозв'язки між критеріями оптимізації, визначати їх відносну важливість, а також здійснювати компромісне ранжування альтернатив вебресурсів залежно від ступеня відповідності ідеальній SEO-конфігурації.

У результаті дослідження було встановлено, що найбільший причинно-наслідковий вплив на загальний рейтинг вебресурсу мають такі фактори, як структура сайту, якість контенту, швидкість завантаження, релевантність ключових слів та профіль зворотних посилань. Інтеграція методів DEMATEL і DANP дала змогу побудувати структуровану карту впливів між цими факторами, що, у свою чергу, дозволило виявити ключові "вузлові" елементи системи SEO та визначити, які з них виступають основними ініціаторами змін.

Застосування методу VIKOR дало змогу здійснити багатокритеріальну оцінку вебресурсів, враховуючи взаємозалежність критеріїв і дозволяючи формувати компромісні рішення в умовах неоднорідності оптимізаційних показників. Такий підхід виявився особливо корисним під час проведення SEO-аудитів та аналізу конкурентного середовища.

Гібридна модель MCDM довела свою ефективність як інструмент стратегічного управління SEO у складному, динамічному цифровому середовищі. Вона сприяє зростанню органічного трафіку, покращенню ранжування сторінок у результатах пошуку та раціоналізації розподілу ресурсів у межах SEO-команд.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на автоматизацію обчислень за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, розширення моделі за рахунок включення поведінкових і соціальних сигналів, а також інтеграцію з інструментами веб-аналітики для оперативного моніторингу змін у показниках ефективності пошукової оптимізації.

Список використаної літератури

1. Amin G. R., Emrouznejad A. Optimizing search engines results using linear programming. *Expert Systems with Applications*. 2011. Vol. 38, no. 9. P. 11534–11537.
2. Aswani R., Kar A. K., Ilavarasan P. V., Dwivedi Y. K. Search engine marketing is not all gold: insights from Twitter and SEOClerks. *International Journal of Information Management*. 2018. Vol. 38, no. 1. P. 107–116.
3. Bar-Ilan J., Mat-Hassan M., Levene M. Methods for comparing rankings of search engine results. *Computer Networks*. 2006. Vol. 50, no. 10. P. 1448–1463.
4. Dye K. Website abuse for search engine optimization. *Network Security*. 2008. No. 3. P. 4–6.
5. Malaga R. A. Search engine optimization – black and white hat approaches. *Advances in Computers*. 2010. Vol. 78. P. 1–39.
6. Mavridis T., Symeonidis A. L. Identifying valid search engine ranking factors in a Web 2.0 and Web 3.0 context for building efficient SEO mechanisms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2015. Vol. 41. P. 75–91.
7. Yalçın N., Köse U. What is search engine optimization: SEO? *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2010. Vol. 9. P. 487–493.
8. Xiang Z., Gretzel U. Role of social media in online travel information search. *Tourism Management*. 2010. Vol. 31, no. 2. P. 179–188.
9. Zhang J., Dimitroff A. The impact of webpage content characteristics on webpage visibility in search engine results (part I). *Information Processing & Management*. 2005. Vol. 41, no. 3. P. 665–690.
10. Tzeng G. H., Huang J. J. Multiple attribute decision making: methods and applications. London : Chapman & Hall/CRC, 2011. 352 p.
11. Tsuei H. J., Tsai W. H., Pan F. T., Tzeng G. H. Improving search engine optimization (SEO) by using hybrid modified MCDM models. *Artificial Intelligence Review*. 2020. Vol. 53. P. 1–16.
12. Jansen B. J., Spink A. An analysis of web searching by European AlltheWeb.com users. *Information Processing & Management*. 2005. Vol. 41, no. 2. P. 361–381.
13. Spink A., Jansen B. J., Blakely C., Koshman S. A study of results overlap and uniqueness among major web search engines. *Information Processing & Management*. 2006. Vol. 42, no. 5. P. 1379–1391.
14. Hung Y. H. та ін. Online reputation management for improving marketing by using a hybrid MCDM model. *Knowledge-Based Systems*. 2012. Vol. 35. P. 87–93.
15. Vaughan L. New measurements for search engine evaluation proposed and tested. *Information Processing & Management*. 2004. Vol. 40, no. 4. P. 677–691.

References

1. Amin, G. R., & Emrouznejad, A. (2011). Optimizing search engines results using linear programming. *Expert Systems with Applications*, 38(9), 11534–11537. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.03.030>
2. Aswani, R., Kar, A. K., Ilavarasan, P. V., & Dwivedi, Y. K. (2018). Search engine marketing is not all gold: Insights from Twitter and SEOClerks. *International Journal of Information Management*, 38(1), 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.07.005>
3. Bar-Ilan, J., Mat-Hassan, M., & Levene, M. (2006). Methods for comparing rankings of search engine results. *Computer Networks*, 50(10), 1448–1463. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2005.10.020>
4. Dye, K. (2008). Website abuse for search engine optimization. *Network Security*, 2008(3), 4–6. [https://doi.org/10.1016/S1353-4858\(08\)70028-X](https://doi.org/10.1016/S1353-4858(08)70028-X)
5. Malaga, R. A. (2010). Search engine optimization – black and white hat approaches. *Advances in Computers*, 78, 1–39. [https://doi.org/10.1016/S0065-2458\(10\)78001-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2458(10)78001-3)
6. Mavridis, T., & Symeonidis, A. L. (2015). Identifying valid search engine ranking factors in a Web 2.0 and Web 3.0 context for building efficient SEO mechanisms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 41, 75–91. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2015.02.002>
7. Yalçın, N., & Köse, U. (2010). What is search engine optimization: SEO? *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 9, 487–493. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.12.185>
8. Xiang, Z., & Gretzel, U. (2010). Role of social media in online travel information search. *Tourism Management*, 31(2), 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2009.02.016>
9. Zhang, J., & Dimitroff, A. (2005). The impact of webpage content characteristics on webpage visibility in search engine results (part I). *Information Processing & Management*, 41(3), 665–690. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2003.12.001>
10. Tzeng, G.-H., & Huang, J.-J. (2011). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Chapman & Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/b11032>
11. Tsuei, H.-J., Tsai, W.-H., Pan, F.-T., & Tzeng, G.-H. (2020). Improving search engine optimization (SEO) by using hybrid modified MCDM models. *Artificial Intelligence Review*, 53, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10462-018-9644-0>

12. Jansen, B. J., & Spink, A. (2005). An analysis of Web searching by European AlltheWeb.com users. *Information Processing & Management*, 41(2), 361–381. [https://doi.org/10.1016/S0306-4573\(03\)00067-0](https://doi.org/10.1016/S0306-4573(03)00067-0)
13. Spink, A., Jansen, B. J., Blakely, C., & Koshman, S. (2006). A study of results overlap and uniqueness among major Web search engines. *Information Processing & Management*, 42(5), 1379–1391. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2005.11.001>
14. Hung, Y.-H., Huang, T.-L., Hsieh, J. C., Tsuei, H. J., Cheng, C.-C., & Tzeng, G.-H. (2012). Online reputation management for improving marketing by using a hybrid MCDM model. *Knowledge-Based Systems*, 35, 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2012.03.004>
15. Vaughan, L. (2004). New measurements for search engine evaluation proposed and tested. *Information Processing & Management*, 40(4), 677–691. [https://doi.org/10.1016/S0306-4573\(03\)00043-8](https://doi.org/10.1016/S0306-4573(03)00043-8)

Дата першого надходження рукопису до видання: 12.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 09.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

УДК 004.412:519.25

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.2.18>

О. С. ОРЕХОВ

аспірант кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
ORCID: 0000-0002-0001-0140

Т. А. ФАРІОНОВА

кандидат технічних наук,
доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
ORCID: 0000-0003-3384-4712

П'ЯТИФАКТОРНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ З МЕТРИК КОДУ JAVA-ЗАСТОСУНКІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЇХ РОЗМІРУ

Достовірна обробка інформації з метрик коду JAVA-застосунків на ранніх стадіях їх проектування має велике значення, оскільки це безпосередньо впливає на прогнозування трудомісткості розробки. В роботі запропоновано математична модель, а саме п'ятифакторна нелінійна регресійна модель, для раннього оцінювання розміру JAVA-застосунків, а саме кількості рядків коду. Об'єктом дослідження є процес обробки інформації з метрик коду програмних JAVA-застосунків. Предметом дослідження є нелінійна регресійна модель для обробки інформації з метрик коду програмних JAVA-застосунків.

Метою роботи є підвищення достовірності обробки інформації з метрик коду, які доступні з UML-діаграми класів, для оцінювання параметру розміру JAVA застосунків на ранніх етапах проектування програмного забезпечення шляхом побудови математичної моделі нелінійної регресії з п'ятьма факторами.

Для досягнення поставленої мети зібрано дані за метриками програмного коду 571 загальних JAVA-застосунків з відкритим кодом, які розташовані на платформі GitHub. Отриманий набір даних випадковим чином розділено на навчальну та тестові вибірки розміром 286 та 285 векторів характеристик. В процесі попередньої обробки даних, для побудови математичної моделі нелінійної регресії з п'ятьма факторами, вперше розділено параметр загальної кількості класів та інтерфейсів на окремі метрики та обрані середні значення видимих методів класів та інтерфейсів, полів класів та зв'язності між класами та інтерфейсами, що дозволило уникнути проблем з мультиколінеарністю для побудови регресійної моделі. Нормалізацію багатовимірних даних проведено за допомогою шестивимірного нормалізуючого перетворення Бокса-Кокса. Отримана математична модель має кращі показники якості, а саме R^2 , MMRE та PRED(0,25), у порівнянні з існуючими трьохфакторною та чотирьохфакторними нелінійними регресійними моделями для обробки інформації з метрик коду JAVA-застосунків для оцінювання їх розміру.

Ключові слова: математична модель, обробка інформації, метрика програмного коду, Java, нормалізуюче перетворення, нелінійна регресія, негаусівські дані.

O. S. ORIEKHOV

Postgraduate Student at the Department of Automated Systems Software
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
ORCID: 0000-0002-0001-0140

T. A. FARIONOVA

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Automated Systems Software Department
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
ORCID: 0000-0003-3384-4712

FIVE-FACTOR MATHEMATICAL MODEL FOR PROCESSING INFORMATION FROM CODE METRICS OF JAVA APPLICATIONS FOR ESTIMATING THEIR SIZE

Reliable information processing from JAVA application code metrics at the early software design stages is crucial, because it directly impacts software development effort estimation. This paper proposes a mathematical model, specifically a five-factor nonlinear regression model, for the early code lines size estimation of JAVA applications. The object of the

© О. С. Орехов, Т. А. Фаріонова, 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

study is the process of information processing from code metrics of JAVA software applications. The subject of the study is a nonlinear regression model for information processing from code metrics of JAVA applications.

The aim of the study is to increase the reliability of information processing from code metrics that are available on the UML class diagram for estimating the size parameter of JAVA applications at the early stages of software design by building a five-factor nonlinear regression mathematical model.

To achieve this goal, data on software code metrics of 571 general open-source JAVA applications hosted on the GitHub platform were collected. The obtained dataset was randomly separated into training and test samples of 286 and 285 vectors, respectively. During data preprocessing for building the mathematical model, the parameter of the total number of classes and interfaces was separated into individual metrics for the first time. Additionally, average values of visible methods of classes and interfaces, class fields, and coupling between classes and interfaces were selected, which allowed avoiding multicollinearity during the regression model construction. Normalization of multidimensional data was performed using a six-dimensional normalizing Box-Cox transformation. The obtained mathematical model demonstrates better quality indicators, namely R^2 , MMRE, and PRED(0.25), compared to existing three-factor and four-factor nonlinear regression models for information processing from JAVA application code metrics to estimate their size.

Key words: mathematical model, information processing, software code metric, Java, normalizing transformation, nonlinear regression, non-Gaussian data.

Постановка проблеми

Достовірна обробка інформації з метрик коду JAVA-застосунків на ранніх стадіях їх проектування має велике значення, безпосередньо впливає на прогнозування трудомісткості розробки, та в цілому на терміни, успішність та вартість програмних проєктів [1-4].

Мова програмування JAVA використовується в багатьох сферах, таких як розробка веб-застосунків, наукові обчислення, розробка штучного інтелекту, розробка мобільних застосунків та ігор та є однією з найбільш поширених мов [5,6]. Отже, підвищення достовірності обробки інформації з метрик програмного коду для оцінювання параметру розміру JAVA-застосунків є актуальною науково-практичною задачею, яка потребує вирішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для обробки інформації з метрик коду для оцінювання параметру розміру JAVA-застосунків побудовано як лінійні [7,8] так і нелінійні [9-14] регресійні рівняння та моделі в залежності від різних метрик коду та мов програмування.

В роботах [12-14] доведено, що регресійні рівняння та моделі [7-11] не забезпечують необхідних рівень достовірності оцінювання параметру розміру відповідно до оцінок критеріїв якості нелінійних регресійних моделей, таких як R^2 , MMRE, and PRED(0.25) [15]. Трьохфакторна [13] та чотирьохфакторна [14] моделі удосконалюють існуючі трьохфакторні моделі [9], чотирьохфакторну нелінійну регресійну модель [11], та мають кращі показники якості математичної моделі. Але, не дивлячись на збільшення точності обробки інформації з метрик коду для оцінювання параметру розміру, моделі [9,11,13-14] побудовані із використанням метрики RFC, яка має певні складності визначення на ранніх стадіях проектування ПЗ. Недоліком цієї метрики є те, що вона вимагає інформацію про унікальні виклики всіх залежних методів незалежно від модифікатору доступу до методу (public, protected, private), на виклик певного методу даного класу. Однак, UML діаграма класів не може надати достатньої деталізації для цієї метрики, оскільки в ній відсутня інформація про внутрішні виклики методів, послідовність викликів і алгоритми, які реалізовані в методах [16].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є підвищення достовірності обробки інформації з метрик коду, які доступні з UML-діаграми класів, для оцінювання параметру розміру JAVA застосунків на ранніх етапах проектування програмного забезпечення шляхом побудови математичної моделі нелінійної регресії з п'ятьма факторами.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для досягнення мети дослідження були зібрані дані за метриками програмного коду 571 загальних JAVA-застосунків з відкритим кодом, розташованих на платформі GitHub (<https://github.com>). За допомогою інструменту СК (<https://github.com/mauricioaniche/ck>) отримані наступні метрики кількість рядків коду (KLOC), загальна кількість класів та інтерфейсів (CLASS) та їх тип (TYPE), загальна кількість видимих методів (VMQ), загальна кількість атрибутів класів (TFQ), зв'язність між класами (CBO). Метрику CLASS, із застосування метрики типу класів TYPE розділено на дві окремі метрики які представляють фактичну кількість класів (CLS) та фактичну кількість інтерфейсів (INFC) окремо. Отриманий набір даних був розділений випадковим чином на навчальну і тестову вибірки з розмірами в 286 та 285 рядків даних відповідно. Дані навчальної вибірки використовуються для побудови математичної моделі, а тестовий набір даних для незалежного контролю достовірності обробки інформації з метрик коду для оцінювання параметру розміру.

Для побудови нелінійної регресійної моделі для обробки інформації з оцінювання розміру KLOC обрана комбінація метрик CLS, INFC, VMQ, TFQ та CBO.

Багатовимірні дані навчальної вибірки були перевірені на наявність мультиколінеарності за коефіцієнтами впливу дисперсії (VIFs) між незалежними факторами. Для багатовимірних даних з k незалежними факторами (X_i), $i = 1, 2, \dots, k$ коефіцієнти VIFs представлені діагональними елементами оберненої коваріаційної $k \times k$ матриці.

Якщо значення коефіцієнту VIF перевищує 10, то це свідчить про наявність проблем із мультиколінеарністю [17]. Для факторів CLS, INFC, VMQ, TFQ та CBO значення коефіцієнтів VIFs дорівнюють 16,4, 2,3, 13,2, 10,8 та 20,9 відповідно, що свідчить про наявність значної мультиколінеарності між незалежними факторами. Для вирішення цієї проблеми, абсолютні значення метрик VMQ, TFQ та CBO замінені на їх середні значення відносно суми загальної кількості класів та інтерфейсів з програмного проекту – aVMQ, aTFQ та aCBO відповідно. Для незалежних факторів CLS, INFC, aVMQ, aTFQ та aCBO розраховані значення оцінок коефіцієнтів VIFs дорівнюють 2,2, 2,3, 1,1, 1,2 та 1,1, що свідчить про відсутність мультиколінеарності між незалежними факторами. Характеристики розподілу навчальної та тестової вибірок наведені в таблиці 1 та таблиці 2.

Таблиця 1

Характеристики розподілу факторів навчальної вибірки

Параметри розподілу вибірки	KLOC	CLS	INFC	aVMQ	aTFQ	aCBO
Середнє	68,813	1158,699	118,210	5,194	2,276	5,937
Медіана	29,746	601,000	46,000	4,986	2,123	5,961
Середньоквадратичне відхилення	106,011	1626,298	219,993	2,097	0,947	1,628
Асиметрія	3,205	2,924	4,612	2,438	0,917	0,054
Екссес	12,133	9,943	29,786	12,527	1,485	0,930
Мінімальне значення	1,586	33	0	1,705	0,133	0,118
Максимальне значення	699,674	10610	2128	21,055	6,337	12,590

Таблиця 2

Характеристики розподілу факторів навчальної вибірки

Параметри розподілу вибірки	KLOC	CLS	INFC	aVMQ	aTFQ	aCBO
Середнє	74,136	1136,039	103,263	5,061	2,387	6,017
Медіана	27,032	527,000	35,000	4,696	2,173	5,847
Середньоквадратичне відхилення	117,831	1610,205	173,496	2,046	1,134	1,487
Асиметрія	2,870	2,738	3,200	1,751	1,820	0,268
Екссес	9,308	8,687	13,005	5,331	6,614	0,508
Мінімальне значення	1,201	29	0	1,589	0,017	2,444
Максимальне значення	777,036	9475	1245	16,995	9,160	11,768

Для оцінювання параметру кількості рядків коду існують різні підходи із застосуванням математичних моделей, у тому числі регресійних. Зазвичай дані за метриками програмного коду не розподілені за нормальним законом, що робить обмежену можливість використання лінійних регресійних моделей для оцінювання розміру рядків коду. Теоретичною умовою застосування лінійних регресійних моделей є нормальний розподіл залишків регресії ϵ або нормальний розподіл багатовимірних даних.

Дані навчальної вибірки перевірено на відповідність нормальному розподілу даних із застосуванням багатовимірного тесту Мардія [18]. Згідно з цим тестом виявлено, що розподіл шестивимірних даних CLS, INFC, aVMQ, aTFQ, aCBO і KLOC навчальної вибірки не є нормальним, оскільки оцінка багатовимірної асиметрії $N\beta_1 / 6 = 5134,45$ перевищує значення квантиля $\chi^2 = 86,99$ для 56 ступенів свободи та рівня значущості $\alpha = 0,005$, а оцінка багатовимірного екссесу $\beta_2 = 219,63$ перевищує значення квантилю розподілу Гауса, яке дорівнює 50,77 для математичного сподівання 48 і дисперсії 1,16. Виникає необхідність побудови нелінійної регресійної моделі для обробки інформації з оцінювання параметру розміру JAVA-застосунків.

Застосування нормалізуючих перетворень дозволяє перейти від нелінійної регресійної моделі до побудови лінійної регресійної моделі.

Введемо наступні позначення для факторів: X_1 - CLS, X_2 - INFC, X_3 - aVMQ, X_4 - aTFQ, X_5 - aCBO, Y - KLOC.

Згідно з запропонованим підходом [19,20], процес побудови математичної моделі є ітеративним та включає шість етапів.

На **першому етапі** застосовується нормалізуюче перетворення негаусівського випадкового вектору $P = \{Y, X_1, X_2, \dots, X_5\}^T$ у гаусівський випадковий вектор $T = \{Z_Y, Z_1, Z_2, \dots, Z_5\}^T$:

$$T = \psi(P). \tag{1}$$

Обернене перетворення до (1) має вигляд

$$P = \psi^{-1}(T), \tag{2}$$

де ψ – вектор взаємозворотніх функцій нормалізуючого перетворення, $\psi = \{\Psi_Y, \Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_5\}^T$.

На **другому етапі** виконується перевірка багатовимірних даних на відповідність нормальному розподілу за допомогою критерію Мардія [18], в залежності від параметрів багатовимірної асиметрії ($\beta_{1,5}$) та ексцесу ($\beta_{2,5}$). Визначення та вилучення викидів із багатовимірних нормалізованих даних здійснюється за квадратом відстані Махаланобіса. Якщо в багатовимірному негаусівському наборі даних є багатовимірний викид, то таку точку відкидають і відбувається перехід до першого етапу, інакше до наступного етапу.

На **третьому етапі**, для нормалізованих даних за перетворенням (1), виконується побудова лінійної регресійної моделі, яка має вигляд

$$\hat{Z}_y + \varepsilon = b_0 + b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + \dots + b_5 Z_5 + \varepsilon, \quad (3)$$

де ε – випадкова величина розподілена за нормальним законом, $\varepsilon \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\varepsilon^2)$; $b_0, b_1, b_2, \dots, b_5$ – параметри лінійного регресійного рівняння (3), які знаходяться за методом найменших квадратів.

На **четвертому етапі** залишки регресії ε побудованої лінійної регресійної моделі (3) перевіряються на відповідність нормальному закону розподілу. Якщо розподіл залишків ε лінійної регресійної моделі для нормалізованих даних не є нормальним, тоді необхідно відкинути точку даних, для якої модуль залишку є максимальним і повернутись до першого кроку. Перевірка нормальності розподілу залишків регресії здійснюється за критерієм Пірсона χ^2 .

На **п'ятому етапі**, після побудови моделі лінійної регресії (3) для нормалізованих даних, застосувавши зворотне перетворення (2), нелінійна регресійна модель має наступний вигляд

$$Y = \Psi_Y^{-1}(\hat{Z}_y + \varepsilon) = \Psi_Y^{-1}(b_0 + b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + \dots + b_5 Z_5 + \varepsilon) \quad (4)$$

На **шостому етапі** побудови нелінійної регресійної моделі (4), розраховуються верхня та нижня границі інтервалів передбачення та проводиться пошук точок значень, які знаходяться поза їх межами. Якщо такі точки знайдені, то вони вважаються викидами і вилучаються із навчальної вибірки. Границі інтервалів передбачення нелінійної регресійної моделі визначаються за наступною формулою

$$\hat{Y}_{PI} = \Psi_Y^{-1} \left(\hat{Z}_y \pm t_{\alpha/2, v} S_{Z_y} \left\{ 1 + \frac{1}{N} + (Z_X^+)^T S_Z^{-1} (Z_X^+) \right\}^{1/2} \right), \quad (5)$$

де $t_{\alpha/2, v}$ – квантиль t-розподілу Стьюдента з $v = N - 5 - 1$ ступенями свободи та $\alpha/2$ – рівнем значущості; $S_{Z_y}^2 = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^N (Z_{y_i} - \hat{Z}_{y_i})^2$; Z_X^+ – вектор центральних факторів(регресорів), який містить значення $\{Z_{1_i} - \bar{Z}_1, Z_{2_i} - \bar{Z}_2, \dots, Z_{5_i} - \bar{Z}_5\}$; S_Z – 5×5 матриця

$$S_Z = \begin{bmatrix} S_{Z_q} S_{Z_r} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де $S_{X_q} S_{X_r} = \sum_{i=1}^N (Z_{q_i} - \bar{Z}_q)(Z_{r_i} - \bar{Z}_r)$, $q, r = 1, 2, \dots, 5$.

Для нормалізації даних було обрано шестивимірне нормалізуюче перетворення Бокса-Кокса:

$$Z_j = \Psi(X_j) = \begin{cases} (X_j^{\lambda_j} - 1) / \lambda_j, & \text{якщо } \lambda_j \neq 0 \\ \ln(X_j), & \text{якщо } \lambda_j = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

де, j змінюється від 1 до 6; X_j – випадкова негаусівська величина, яка нормалізується; Z_j – нормалізована гаусівська величина; λ_j – параметр перетворення Бокса-Кокса.

Для перетворення Бокса-Кокса, логарифмічна функція правдоподібності оцінювання параметрів перетворення [21] має вигляд

$$l(X, \theta) = \sum_{j=1}^k (\lambda_j - 1) \sum_{i=1}^N \ln(X_{ji}) - \frac{N}{2} \ln[\det(S_N)], \quad (8)$$

де $l(P, \theta)$ – логарифмічна функція правдоподібності; θ – вектор параметрів перетворення, $\theta = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_6\}$; N – розмір вибірки.

S_N – вибіркова коваріаційна матриця для компонентів вектору Z :

$$S_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})(Z_i - \bar{Z})^T, \quad (9)$$

де Z_i – гаусівський випадковий вектор, $Z_i = \{Z_{1i}, Z_{2i}, \dots, Z_{6i}\}^T$; \bar{Z} – вектор вибірових середніх, $\bar{Z} = \{\bar{Z}_1, \bar{Z}_2, \dots, \bar{Z}_6\}$. Застосування нормалізуючого перетворення Бокса-Кокса вимагає збільшення метрики кількості інтерфейсів INFC на 1, оскільки це перетворення існує тільки для додатних чисел.

П’ятифакторну нелінійну регресійну модель побудовано за 26 ітерацій. При побудові моделі виключено 23 багатовимірні точки за квадратом відстані Махаланобіса та 2 багатовимірні точки були за межами інтервалу передбачення. Для останньої ітерації значення тестової статистики розподілу для багатовимірної асиметрії $B_1 N / 6$, яка дорівнює 81,82, що не перевищує значення квантилю розподілу χ^2 -квадрат, що становить 86,99 для 56 ступенів свободи та рівня значущості 0,005 та тестова статистика розподілу даної вибірки для багатовимірного ексцесу B_2 , яка становить 47,60, не перевищує значення квантиля нормального розподілу, яке становить 50,84 для математичного сподівання 48 і дисперсії 1,21 та рівня значущості α 0,005, що свідчить про нормальну природу розподілу нормалізованих даних без викидів.

Оцінки параметрів багатовимірного нормалізуючого перетворення (7) отримані шляхом максимізації логарифмічної функції правдоподібності (8), та для залежного фактора Y і незалежних факторів X_1, X_2, X_3, X_4 та X_5 мають наступні значення $\hat{\lambda}_Y = 1,629679 \cdot 10^{-2}$, $\hat{\lambda}_{X_1} = 4,365094 \cdot 10^{-2}$, $\hat{\lambda}_{X_2} = 0,102789$, $\hat{\lambda}_{X_3} = -0,221238$, $\hat{\lambda}_{X_4} = 0,354485$ і $\hat{\lambda}_{X_5} = 0,894651$ відповідно для останньої ітерації. Оцінки параметрів п’ятифакторної лінійної регресійної моделі на основі нормалізованих даних, які отримані за методом найменших квадратів, становлять $\hat{b}_0 = -4,117734$, $\hat{b}_1 = 0,809663$, $\hat{b}_2 = -4,599656 \cdot 10^{-3}$, $\hat{b}_3 = 1,175418$, $\hat{b}_4 = 0,252310$ та $\hat{b}_5 = -1,608608 \cdot 10^{-2}$.

П’ятифакторна лінійна регресійна модель для нормалізованих даних має наступний вигляд:

$$\hat{Z}_Y + \varepsilon = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 \psi_1(X_1) + \hat{b}_2 \psi_2(X_2 + 1) + \hat{b}_3 \psi_3(X_3) + \hat{b}_4 \psi_4(X_4) + \hat{b}_5 \psi_5(X_5) + \varepsilon \quad (10)$$

де $\psi_j(X_j) = (X_j^{\hat{\lambda}_{X_j}} - 1) / \hat{\lambda}_{X_j}$, – нормалізуюче перетворення Бокса-Кокса із значенням оцінок перетворення для незалежного фактору X_j ($j = 1, \dots, 5$). П’ятифакторна нелінійна регресійна модель \hat{Y} має наступний вигляд

$$\hat{Y} = \left[\hat{\lambda}_Y (\hat{Z}_Y + \varepsilon) + 1 \right]^{\frac{1}{\hat{\lambda}_Y}}, \quad (11)$$

де \hat{Z}_Y – оцінка значення залежної змінної для нормалізованих даних за рівнянням (10), \hat{Y} – оцінка значень залежної змінної для початкових даних.

Інтервал передбачення нелінійної регресійної моделі \hat{Y} (11) заданий як

$$\hat{Y}_{PI} = \psi_Y^{-1} \left(\hat{Z}_Y \pm \hat{t}_{\alpha/2, v} \hat{S}_{Z_Y} \left\{ 1 + \frac{1}{N} + (Z_X^+)^T \hat{S}_Z^{-1} (Z_X^+) \right\}^{1/2} \right), \quad (12)$$

де \hat{Z}_Y – оцінка параметру розміру для нормалізованих даних за (10).

Для останньої ітерації значення нормалізованих вибірових середніх $\bar{Z}_1, \bar{Z}_2, \bar{Z}_3, \bar{Z}_4$ та \bar{Z}_5 становлять 7,411555, 4,778777, 1,312994, 0,882226, та 4,430020 відповідно. Квантиль t -розподілу Стьюдента $\hat{t}_{\alpha/2, v} = 2,5952$ для рівня значущості $\alpha = 0,01$ та 255 ступенів свободи; $\hat{S}_{Z_Y} = 0,171633$. Обернена коваріаційна матриця (6) має вигляд

$$\hat{S}_Z^{-1} = \begin{vmatrix} 8,0315 \cdot 10^{-3} & -5,2507 \cdot 10^{-3} & -2,5413 \cdot 10^{-3} & -1,0127 \cdot 10^{-3} & -5,4032 \cdot 10^{-4} \\ -5,2507 \cdot 10^{-3} & 4,2867 \cdot 10^{-3} & 3,4181 \cdot 10^{-4} & 1,2176 \cdot 10^{-3} & 3,2418 \cdot 10^{-4} \\ -2,5413 \cdot 10^{-3} & 3,4181 \cdot 10^{-4} & 1,0058 \cdot 10^{-1} & -1,2670 \cdot 10^{-2} & -5,2167 \cdot 10^{-3} \\ -1,0127 \cdot 10^{-3} & 1,2176 \cdot 10^{-3} & -1,2670 \cdot 10^{-2} & 1,9085 \cdot 10^{-2} & -2,0527 \cdot 10^{-3} \\ -5,4032 \cdot 10^{-4} & 3,2418 \cdot 10^{-4} & -5,2167 \cdot 10^{-3} & -2,0527 \cdot 10^{-3} & 3,3910 \cdot 10^{-3} \end{vmatrix}$$

Зменшення інтервалів передбачення можна досягти шляхом застосування квантилю t -розподілу Стьюдента $\hat{t}_{\alpha/2, v}$ з рівнем значущості $\alpha = 0,05$ та 255 ступенів свободи, який становить 1,9693.

Побудовану модель (11) перевірено за критеріями якості R^2 , $MMRE$ та $PRED(0,25)$. Для отриманої п’ятифакторної нелінійної регресійної моделі $R^2 = 0,9647$, $MMRE = 0,1305$ та $PRED(0,25) = 0,8927$, що свідчить про високий рівень достовірності моделі для оцінювання параметру розміру JAVA-застосунків.

Проведемо порівняльний аналіз оцінок показників якості побудованої моделі з іншими моделями [13,14,22] на навчальній і тестовій вибірках JAVA-застосунків (див. табл 3, 4).

Таблиця 3

Порівняльний аналіз оцінок показників якості нелінійних регресійних моделей для навчальної вибірки

№	Нелінійна регресійна модель	Навчальна вибірка		
		R ²	MMRE	PRED
1	Трьохфакторна на базі перетворення Джонсона [13]	0,9179	0,1560	0,7867
2	Чотирьохфакторна на основі багатовимірного перетворення Бокса-Кокса [14]	0,9067	0,1526	0,8181
3	Чотирьохфакторна на основі багатовимірного перетворення Бокса-Кокса [22]	0,9150	0,1717	0,8146
4	Побудована п'ятифакторна нелінійна регресійна модель (11)	0,9294	0,1540	0,8462

Таблиця 4

Порівняльний аналіз оцінок показників якості нелінійних регресійних моделей для тестової вибірки

№	Нелінійна регресійна модель	Тестова вибірка		
		R ²	MMRE	PRED
1	Трьохфакторна на базі перетворення Джонсона [13]	0,9094	0,1583	0,8315
2	Чотирьохфакторна на основі багатовимірного перетворення Бокса-Кокса [14]	0,9052	0,1492	0,8421
3	Чотирьохфакторна на основі багатовимірного перетворення Бокса-Кокса [22]	0,9075	0,1854	0,7439
4	Побудована п'ятифакторна нелінійна регресійна модель (11)	0,9193	0,1742	0,7825

Отже, відповідно до отриманих оцінок параметрів якості нелінійних регресійних моделей для початкової навчальної та тестової вибірок JAVA-застосунків (табл. 3 та табл. 4), п'ятифакторна нелінійна регресійна модель (11) на базі шестивимірного перетворення Бокса-Кокса показала найкращу точність оцінювання серед запропонованих моделей, які дозволяють оцінити параметр розміру JAVA-застосунків.

Висновки

1. Вирішено задачу підвищення достовірності обробки інформації з метрик коду, які доступні на UML-діаграмі класів, для оцінювання параметру розміру JAVA застосунків на ранніх етапах проектування програмного забезпечення шляхом побудови математичної моделі нелінійної регресії з п'ятьма факторами.

2. Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше побудована п'ятифакторна нелінійна регресійна модель на основі шестивимірного перетворення Бокса-Кокса із використанням метрик загальної кількості класів (CLS), загальної кількості інтерфейсів (INFC), середніх значення метрик видимих методів класів (aVMQ), полів класів (aTFQ) та значення зв'язності між класами (aCBO) відносно суми загальної кількості класів та інтерфейсів. Розділення метрики загальної кількості класів та інтерфейсів (CLASS) на 2 окремі метрики дозволило підвищення достовірності оцінювання параметру розміру із використанням п'ятифакторної моделі для загальних JAVA-застосунків.

3. Практичне значення отриманих результатів полягає у використанні побудованої п'ятифакторної нелінійної регресійної моделі для оцінювання параметру розміру із подальшим використанням у відповідних моделях оцінювання трудомісткості розробки програмного забезпечення.

Список використаної літератури

- Boehm B., Abts C., Brown A.W., Chulani S., Clark B.K., Horowitz E., Madachy R., Reifer D., Steece B. Software cost estimation with COCOMO II. Prentice Hall. 2000.
- Munialo S.W. A Review of Agile Software Effort Estimation Methods // *International Journal of Computer Applications Technology and Research. Association of Technology and Science*. 2016. Vol. 5. pp. 612–618. DOI:10.7753/IJCATR0509.1009.
- Johnson J., Mulder H. Endless modernization: How infinite flow keeps software fresh. ResearchGate. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/348849361_Endless_Modernization_How_Infinite_Flow_Keeps_Software_Fresh
- The Standish Group. Chaos report 2015. 2015. URL: https://standishgroup.com/sample_research_files/CHAOSReport2015-Final.pdf
- Oracle. Java. 2025. URL: <https://www.oracle.com/java/>
- Cass S. Top programming languages 2024. IEEE Spectrum. 2024. URL: <https://spectrum.ieee.org/top-programming-languages-2024>
- Tan H.B.K., Zhao Y., Zhang H. Estimating LOC for information systems from their conceptual data models // *Proceedings – International Conference on Software Engineering*. 2006. pp. 321-330. DOI:10.1145/1134285.1134331.
- Tan H.B.K., Zhao Y., Zhang H. Conceptual Data Model-Based Software Size Estimation for Information Systems // *ACM Transactions of Software Engineering and Methodology*. 2009. Vol. 19. DOI:10.1145/1571629.1571630.
- Приходько Н.В., Приходько С.Б. Нелінійна регресійна модель для оцінювання розміру програмного забезпечення промислових інформаційних систем на Java // *Моделювання та інформаційні технології*. 2018. Вип. 85. С. 81–88. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mtit_2018_85_14

10. Макарова Л.М., Приходько Н.В., Кудін О.О. Побудова нелінійної регресійної моделі для оцінювання розміру веб-додатків, реалізованих мовою Java // *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2019. № 2 (69). С. 145–153. URL: <http://eir.nuos.edu.ua/handle/123456789/4443>
11. Приходько С.Б., Приходько Н.В., Смикодуб Т.Г. Чотирьохфакторна нелінійна регресійна модель для оцінювання розміру JAVA-застосунків з відкритим кодом // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки* Том 31 (70) № 2 Частина 1. 2020. С. 157–162. DOI:10.32838/2663-5941/2020.2-1/25
12. Орехов О.С., Фаріонова Т.А. Математичні моделі для оцінювання розміру JAVA-застосунків // *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. Т. 89, № 2. С. 196–203. DOI:10.35546/kntu2078-4481.2024.2.28.
13. Oriekhov O., Farionova T., Chernova L. Three-factor nonlinear regression model of estimating the size of JAVA-software // *Proceedings of the International Conference on Information Control Systems and Technologies (ICST-2024)*. 2024. pp. 506–518. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3790/paper44.pdf>
14. Орехов О.С. Чотирьохфакторна нелінійна регресійна модель для оцінювання розміру JAVA-застосунків на ранніх стадіях розробки // *Розвиток інформаційно-керуючих систем та технологій*. 2024. С. 360–379. DOI:10.36059/978-966-397-422-4
15. Port D., Korte M. Comparative studies of the model evaluation criteria MMRE and PRED in software cost estimation research // *Proceedings of the 2nd ACM-IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement*, New York, 2008. pp. 51–60. DOI:10.1145/1414004.1414015
16. Subramanyam R., Krishnan M. Empirical analysis of CK metrics for object-oriented design complexity: Implications for software defects // *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2003. Vol. 29, No. 4. pp. 297–310. DOI:10.1109/TSE.2003.1191795.
17. Olkin I., Sampson A.R. Multivariate Analysis: Overview // *International encyclopedia of social & behavioral sciences (eds.) 1st edn.*, Elsevier, Pergamon, 2001. pp. 10240–10247
18. Mardia K. V., Measures of multivariate skewness and kurtosis with applications // *Biometrika*. 1970. Vol. 57. pp. 519–530. DOI:10.1093/biomet/57.3.519.
19. Prykhodko S., Prykhodko N., Mathematical Modeling of Non-Gaussian Dependent Random Variables by Nonlinear Regression Models Based on the Multivariate Normalizing Transformations // *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020). Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. Vol. 1265. PP. 166-174. DOI:10.1007/978-3-030-58124-4_16
20. Prykhodko S., Prykhodko N., Makarova L., Pukhalevych A. Outlier Detection in Non-Linear Regression Analysis Based on the Normalizing Transformations // *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. Lviv-Slavske, Ukraine, 2020. pp. 407–410, DOI:10.1109/TCSET49122.2020.235464.
21. Lindsey C., Sheather S. Power transformation via multivariate Box–Cox // *The Stata Journal*. 2010. Vol. 10, No. 1. pp. 69–81. DOI:10.1177/1536867X1001000108.
22. Oriekhov O., Farionova T., Chernova L., Vorona M. A Five-Factor Nonlinear Regression Model for JAVA Applications Size Estimation // *Proceedings of VI International Workshop on IT Project Management*. 2025. Vol. 4023. pp. 1–10. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4023/paper1.pdf>

References

1. Boehm, B., Abts, C., Brown, A. W., Chulani, S., Clark, B. K., Horowitz, E., Madachy, R., Reifer, D., & Steece, B. (2000). *Software cost estimation with COCOMO II*. Prentice Hall.
2. Munialo, S.W., & Muketha, G.M. (2016). A review of Agile Software effort estimation methods. *International Journal of Computer Applications Technology and Research*, 5 (9), 612–618. <https://doi.org/10.7753/ijcatr0509.1009>
3. Johnson, J., & Mulder, H. (2021, Jan). *Endless modernization: How infinite flow keeps software fresh*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/348849361_Endless_Modernization_How_Infinite_Flow_Keeps_Software_Fresh
4. The Standish Group. (2015). *Chaos report 2015*. https://standishgroup.com/sample_research_files/CHAOSReport2015-Final.pdf
5. Oracle. (2025, November 10). Java. Retrieved from <https://www.oracle.com/java/>
6. Cass, S. (2024, August 22). Top programming languages 2024. IEEE Spectrum. <https://spectrum.ieee.org/top-programming-languages-2024>
7. Tan, H. B. K., Zhao, Y., & Zhang, H. (2006). Estimating LOC for information systems from their conceptual data models. In *Proceedings of the 28th International Conference on Software Engineering* (pp. 321–330). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/1134285.1134331>
8. Tan, H. B. K., Zhao, Y., & Zhang, H. (2009). Conceptual data model-based software size estimation for information systems. *ACM Transactions of Software Engineering and Methodology*, 19(2), 1-37. <https://doi.org/10.1145/1571629.1571630>

9. Prykhodko, N.V. & Prykhodko S.B. (2018). A nonlinear regression model for estimation of the size of Java enterprise information systems software. *Modeling and Information Technologies*, Vol. 85, 81–88. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mtit_2018_85_14 [in Ukrainian]
10. Makarova L.M., Prykhodko N.V. & Kudin O.O. (2019). Constructing the non-linear regression model for size estimation of WEB-applications implemented in JAVA. *Bulletin of Kherson National Technical University*, Vol. 69, P. 145–153. URL: <http://eir.nuos.edu.ua/handle/123456789/4443> [in Ukrainian]
11. Prykhodko, S.B., Prykhodko, N.V. & T. G. Smykodub. (2020). Four-factor non-linear regression model to estimate the size of open source Java-based applications. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, Vol. 70, 157-162. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/25> [in Ukrainian]
12. Oriekhov, O., & Farionova, T. (2024). Mathematical models for the size estimating of JAVA applications. *Herald (Kherson National Technical University)*, 89, 196–203. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.28>
13. Oriekhov, O., Farionova, T., & Chernova, L. (2024). Three-factor nonlinear regression model of estimating the size of JAVA-software. In *Proceedings of the International Conference on Information Control Systems and Technologies (ICST-2024)*, September 23-25, 2024. CEUR Workshop Proceedings. pp. 506-518. <https://ceur-ws.org/Vol-3790/paper44.pdf>
14. Oriekhov, O. (2024). The four-factor nonlinear regression model for early JAVA-applications size estimation. In *ICST-2024: Advances in Information Control Systems and Technologies*, 360–379. <https://doi.org/10.36059/978-966-397-422-4>
15. Port, D., & Korte, M. (2008). Comparative studies of the model evaluation criterions MMRE and PRED in software cost estimation research. In *Proceedings of the 2nd ACM-IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement* (pp. 51–60). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/1414004.1414015>
16. Subramanyam, R., & Krishnan, M. (2003). Empirical analysis of CK metrics for object-oriented design complexity: Implications for software defects. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 29(4), 297–310. <https://doi.org/10.1109/TSE.2003.1191795>
17. Olkin, I., & Sampson, A. R. (2001). Multivariate analysis: Overview. In N. J. Smelser & P. B. Baltes (Eds.), *International encyclopedia of the social & behavioral sciences* (1st ed., pp. 10240–10247). Elsevier.
18. Mardia, K. V. (1970). Measures of multivariate skewness and kurtosis with applications. *Biometrika*, 57(3), 519–530. <https://doi.org/10.1093/biomet/57.3.519>
19. Prykhodko, S., & Prykhodko, N. (2021). Mathematical modeling of non-Gaussian dependent random variables by nonlinear regression models based on the multivariate normalizing transformations. In S. Shkarlet, V. Morozov, & A. Palagin (Eds.), *Mathematical modeling and simulation of systems (MODS'2020)* (pp. 166–174). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_16
20. Prykhodko, S., Prykhodko, N., Makarova, L., & Pukhalevych, A. (2020). Outlier detection in non-linear regression analysis based on the normalizing transformations. In *Proceedings of 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)* (с. 407–410). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235464>
21. Lindsey, C., & Sheather, S. (2010). Power transformation via multivariate Box–Cox. *The Stata Journal*, 10(1), 69–81. <https://doi.org/10.1177/1536867X1001000108>
22. Oriekhov, O., Farionova, T., Chernova, L., & Vorona, M. (2025). A Five-Factor Nonlinear Regression Model for JAVA Applications Size Estimation. In *Proceedings of VI International Workshop on IT Project Management*, Kyiv, Ukraine, May 22, 2025. CEUR Workshop Proceedings, Vol. 4023, pp. 1-10. <https://ceur-ws.org/Vol-4023/paper1.pdf>

Дата першого надходження рукопису до видання: 15.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

Ф. Ф. САЙБЕРТ

аспірант кафедри програмного забезпечення систем
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
ORCID: 0009-0004-8081-4174

Ю. Ю. БІЛАК

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
завідувач кафедри програмного забезпечення систем
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
ORCID: 0000-0001-5989-1643

АДАПТИВНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА СПЕКТРАЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НА БАЗІ ФІЗИЧНО-ІНФОРМОВАНОГО МОНТЕ-КАРЛО

У статті представлено розробку концепції адаптивної інформаційної системи спектрального моделювання, що базується на фізично-інформованому циклі Монте-Карло (АФІЦ-МК). Метою дослідження є підвищення точності та ефективності моделювання оптичних характеристик складних гетерогенних середовищ шляхом інтеграції детермінованих і стохастичних методів у єдиній адаптивній архітектурі. Запропонована система реалізує гібридну мультифідельну структуру, яка поєднує методи скінченних різниць у часовій області і скінченних елементів із стохастичними алгоритмами Монте-Карло, забезпечуючи динамічне узгодження рівнів точності в процесі симуляції.

Особливістю системи є поєднання low-fidelity емуляцій із періодичними high-fidelity симуляціями (~10%), що дозволяє стабілізувати розрахунковий процес, проводити регулярну корекцію моделей та зменшити обчислювальні витрати до 40% без втрати фізичної достовірності результатів. До складу алгоритму включено механізм адаптивного уточнення сітки в областях інтенсивних спектральних змін, а також онлайн-статистичне усереднення за методом Велфорда, що забезпечує стійкість до шуму та підвищення точності статистичних оцінок.

Для перевірки ефективності АФІЦ-МК проведено чисельне моделювання спектрів пропускання та відбивання для трьох класів матеріалів – композитів, біологічних тканин і наноструктур. Результати засвідчили, що композити характеризуються високою стабільністю оптичних параметрів, біологічні тканини виявляють найбільшу варіативність через неоднорідність структури, а наноструктури демонструють високу чутливість до локальних геометричних змін.

Розроблений алгоритм забезпечує збалансоване поєднання фізичної коректності, адаптивності та обчислювальної ефективності. Отримані результати відкривають перспективи використання АФІЦ-МК у системах інтелектуального спектрального аналізу, автоматизованих лабораторіях, а також у гібридних AI-платформах для прогнозування та оптимізації оптичних властивостей складних матеріалів і біоінженерних структур.

Ключові слова: спектральне моделювання; гетерогенні середовища; чисельні методи; адаптивна сітка; мультифідельна стратегія; фізично-інформоване моделювання; стохастичні алгоритми.

F. F. SAIBERT

Postgraduate Student at the Department of Systems Software
State University “Uzhgorod National University”
ORCID: 0009-0004-8081-4174

YU. YU. BILAK

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associated Professor,
Head of the Department of Systems Software
State University “Uzhgorod National University”
ORCID: 0000-0001-5989-1643

ADAPTIVE INFORMATION SYSTEM FOR SPECTRAL MODELING BASED ON PHYSICALLY-INFORMED MONTE CARLO

The article presents the development of a concept for an adaptive information system for spectral modeling based on the Physically-Informed Monte Carlo Cycle (APIMC). The purpose of the study is to enhance the accuracy and efficiency of modeling optical properties of complex heterogeneous media through the integration of deterministic and stochastic

methods within a unified adaptive architecture. The proposed system implements a hybrid multi-fidelity structure that combines the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) and Finite Element Method (FEM) approaches with stochastic Monte Carlo algorithms, ensuring dynamic alignment of accuracy levels during the simulation process.

A distinctive feature of the system is the combination of low-fidelity emulations with periodic high-fidelity simulations (~10%), which stabilizes computations, enables regular model correction, and reduces computational costs by up to 40% without compromising physical validity. The algorithm incorporates an adaptive mesh refinement mechanism in regions of intensive spectral variation, as well as online statistical averaging based on the Welford method, which improves noise resistance and enhances the precision of statistical estimates.

To evaluate the efficiency of the APIMC approach, numerical simulations of transmission and reflection spectra were conducted for three classes of materials—composites, biological tissues, and nanostructures. The results demonstrated that composites exhibit high stability of optical parameters, biological tissues show the greatest variability due to structural heterogeneity, and nanostructures reveal strong sensitivity to local geometric changes.

The developed algorithm provides a balanced combination of physical correctness, adaptability, and computational efficiency. The obtained results open new prospects for applying the APIMC algorithm in intelligent spectral analysis systems, automated laboratories, and hybrid AI platforms for forecasting and optimizing the optical properties of complex materials and bioengineered structures.

Key words: spectral modeling; heterogeneous media; numerical methods; adaptive mesh; multifidelity strategy; physically informed modeling; stochastic algorithms.

Постановка проблеми

Сучасні матеріали дедалі частіше мають складну гетерогенну структуру – композити з різнорозмірними включеннями, біологічні тканини з неоднорідними клітинними компонентами або наноструктуровані покриття із чітко розподіленими наночастинками. У таких системах спектральний аналіз є важливим інструментом для неінвазивного дослідження внутрішньої структури, складу та оптичних властивостей, що дозволяє визначати концентрації компонентів, товщини шарів, наявність дефектів або домішок, а також динамічні процеси.

Традиційні методи (аналітичні моделі та експериментальні вимірювання) мають суттєві обмеження. Аналітичні моделі, такі як моделі ефективного середовища чи багаточарові формули, часто базуються на спрощених припущеннях (однорідність, слабка неоднорідність, ізотропність) і не дозволяють точно врахувати просторові флуктуації та стохастичні ефекти. Експериментальні методи забезпечують «реальні» спектри, але не завжди дозволяють інтерпретувати складну морфологію матеріалу, особливо коли внутрішня структура прихована або пошкоджена. Зростає потреба у математичних та чисельних моделях, які здатні прогнозувати спектри для заданих гетерогенних конфігурацій та інтерпретувати виміряні спектри через обернене моделювання. Такі моделі поєднують фізично обґрунтовані рівняння (рівняння Максвелла, рівняння переносу випромінювання) з адаптивними чисельними методами (FDTD, FEM, RCWA, стохастичні моделі). До прикладу, спектральні методи дозволяють моделювати мікроструктури у матеріалах (spectral methods for broad-field modeling) з високою роздільною здатністю та точністю [1]. Загальні принципи мультискейл-моделювання ефективних властивостей композитів описані в останніх оглядах [2], тоді як нові концепції до врахування просторової стохастичності і флуктуацій у неоднорідних середовищах дозволяють значно покращити точність прогнозування спектрів [3]. Проте у більшості досліджень залишається недостатньо опрацьованим поєднання стохастичності, впливу випадкових включень та інтеграції обернених алгоритмів чи апаратів машинного навчання. Саме це визначає актуальність подальших досліджень у напрямку гібридних фізико-чисельних моделей зі статистичним та AI-підсиленням компонентом.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи – розробити та апробувати інформаційну технологію спектроскопічного моделювання складних гетерогенних середовищ, засновану на адаптивному фізико-інформованому циклі Монте-Карло, що забезпечує комплексне поєднання фізичних моделей, чисельних методів і стохастичного усереднення для підвищення точності та ефективності розрахунку спектральних характеристик.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі основні завдання:

1. Обґрунтувати теоретичні основи взаємодії електромагнітного випромінювання з гетерогенними матеріалами та сформулювати математичні моделі, придатні для опису процесів поглинання, розсіяння й флуоресценції.
2. Реалізувати інтеграцію фізично обґрунтованих моделей (ЕМА) із чисельними методами (FDTD, FEM, Monte-Carlo) для врахування просторової неоднорідності, дисперсії матеріалів та стохастичних ефектів.
3. Розробити адаптивний обчислювальний цикл з локальним уточненням сітки, що забезпечує підвищення роздільної здатності в областях інтенсивних спектральних змін і скорочення обчислювальних витрат.
4. Запровадити мультифідельну стратегію, яка поєднує low-fidelity емуляційні моделі з періодичними high-fidelity обчисленнями для стабілізації результатів і збереження фізичної достовірності.
5. Провести чисельну апробацію алгоритму на прикладі трьох класів матеріалів (композити, біологічні тканини, наноструктури) та виконати порівняльний аналіз.
6. Оцінити ефективність і точність запропонованої технології, визначивши ступінь варіативності спектрів, рівень похибки моделювання та потенціал подальшої автоматизації процесів спектрального аналізу.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні адаптивного фізично-інформованого циклу Монте-Карло, який уперше інтегрує фізично обґрунтовані моделі ефективного середовища та переносу випромінювання з чисельними методами (FDTD, FEM) і мультифідельною стратегією. Запропоновано алгоритм локального уточнення сітки за градієнтом спектральної зміни, що забезпечує підвищення точності моделювання при зниженні обчислювальних витрат. Уперше реалізовано гібридну схему поєднання low- і high-fidelity симуляцій для стабілізації результатів без втрати фізичної достовірності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні наукові праці демонструють, що для моделювання оптичних властивостей складних гетерогенних матеріалів використовують широкий набір методів та моделей: рівняння Максвелла з чисельними методами (FDTD, FEM, RCWA), рівняння переносу випромінювання та стохастичні методи (Monte-Carlo), а також різні формули ефективного середовища і сучасні ML-підходи для емулювання «дорогої» фізики. Такі огляди дають міцну методологічну базу; одночасно вони вказують на проблеми масштабування, врахування стохастичності та інтеграції прямих і обернених задач, що обґрунтовує потребу в комплексному гібридному моделюванні [4,5].

Класичні аналітичні моделі ефективного середовища та локальних наближень, представлені у працях [6,7], стали фундаментом для опису гетерогенних матеріалів через їхні усереднені оптичні параметри – ефективні показники заломлення, поглинання та дисперсії. Вони забезпечують високу точність у випадках, коли неоднорідності є малими порівняно з довжиною хвилі (розмір включень $\ll \lambda$), що робить їх особливо корисними для аналізу дрібнодисперсних або слабко неоднорідних структур. Проте такі моделі мають певні обмеження, вони не враховують просторову кореляцію розподілу включень, не придатні для опису наноструктурованих чи фрактальних систем і не відображають ефектів розсіювання високого порядку.

Традиційні чисельні методи, такі як FDTD, FEM, RCWA та Monte-Carlo, відіграли ключову роль у розвитку спектроскопічного моделювання, забезпечивши можливість детального відтворення просторового розподілу електромагнітних полів, процесів флуоресценції та розсіяння світла у складних середовищах. Зокрема, роботи [5,8] систематизували практичні аспекти FDTD-моделювання та порівняли його з іншими чисельними методами, тоді як [4,9] узагальнили метод Monte-Carlo до задач переносу випромінювання у біологічних і гетерогенних середовищах. Методи FDTD і FEM забезпечують високу точність при описі періодичних або локалізованих структур, тоді як Monte-Carlo підходить для сильно розсіюючих та випадкових систем. Водночас ці методи мають суттєві обмеження, що пов'язані зі значними обчислювальними витратами (особливо для тривимірних FDTD-моделей) та труднощі з інтеграцією процесів на різних просторових масштабах. Також відсутність врахування реальної стохастичної мікроструктури або фізико-хімічних флуктуацій. Загалом, подальший розвиток у цьому напрямі передбачає поєднання детермінованих та стохастичних методів у єдині гібридні схеми, а також впровадження адаптивних сіток і алгоритмів оптимізації для зменшення обчислювального навантаження без втрати точності.

Мультискейл та стохастичні розширення чисельних методів стали наступним кроком у розвитку спектроскопічного моделювання, оскільки вони дозволяють поєднати детальний опис мікроскопічних процесів із макроскопічними статистичними закономірностями. У роботі [2] розглянуто сучасні методи мультискейл-моделювання, які дозволяють описувати ефективні властивості гетерогенних матеріалів через комбінацію локальних і глобальних рівнів. У праці [10] запропонували поєднання методів Monte-Carlo та FDTD, що дало змогу враховувати як стохастичність розподілу включень, так і просторові особливості електромагнітного поля. У [11] розширено застосування класичних FDTD-моделей для роботи з невизначеностями, а у [12] здійснили експериментальну валідацію спектроскопічної Monte-Carlo моделі, підтверджуючи її придатність для опису реальних середовищ. Незважаючи на високу точність і фізичну адекватність таких моделей, їх практичне застосування ускладнюється через громіздку програмну реалізацію, яка потребує великих вибірок для статистичного усереднення та труднощами узгодження меж між локальними й глобальними моделями. Подальший розвиток цього напрямку вимагає автоматизованого формування мультифізичних моделей із самоналаштуванням сітки та інтеграцію алгоритмів оптимізації й нейромережових предикторів для прискорення розрахунків і зменшення потреби у ручному калібруванні.

Сучасний етап розвитку характеризується активною інтеграцією методів штучного інтелекту з традиційними фізичними моделями, що формує новий клас гібридних інтелектуальних систем [13,14], які забезпечують високу точність відтворення спектральних характеристик складних матеріалів. У цих концепціях машинне навчання використовується не лише як засіб апроксимації, але й як інструмент побудови мультифідельних моделей та емуляторів складних фізичних процесів [15,16]. Physics-informed нейронні мережі дозволяють безпосередньо враховувати фізичні закони у процесі навчання, що підвищує достовірність і стабільність розрахунків [17].

Останні дослідження у цій галузі демонструють чітку тенденцію до інтеграції інтелектуальних систем у процес спектроскопічного аналізу. У роботі [18] показано, що машинне навчання радикально підвищує ефективність інтерпретації NMR-спектрів, забезпечуючи автоматизоване відновлення структурних характеристик. У праці [19] узагальнили сучасні алгоритмічні методи застосування штучного інтелекту в спектроскопії, від моделювання до генеративного синтезу даних, підкресливши роль глибоких нейронних мереж у створенні нових хімічних знань.

Праці [20-21] зосереджені на побудові гібридних нейромережевих систем для оптимізації спектроскопічних вимірювань, моделювання та прогнозування параметрів у Raman-спектроскопії, а також на створенні інформаційних систем, що об'єднують фізичне моделювання з алгоритмами машинного навчання. Сукупність цих результатів окреслює перехід від класичних чисельних методів до інтелектуально керованих систем спектроскопічного аналізу нового покоління.

Викладення основного матеріалу дослідження

Методи та моделі

Теоретичні основи спектроскопічного моделювання. Теоретичні основи спектроскопічного моделювання базуються на фізичних принципах взаємодії електромагнітного випромінювання з матеріалами, що визначає характер їх спектральних характеристик. Для складних гетерогенних середовищ, таких як композити, біологічні тканини або наноструктуровані покриття, ця взаємодія має багатокомпонентний характер і включає поглинання, розсіяння, флуоресценцію та резонансні ефекти.

Поглинання зумовлене переходами електронів, іонів або молекул у збуджені стани при взаємодії з фотонами. У видимому та інфрачервоному діапазонах домінують коливальні та обертальні переходи, тоді як в ультрафіолетовому та рентгенівському спектрах – електронні. У гетерогенних середовищах поглинання залежить не лише від складу, а й від морфології, включаючи товщину шарів, концентрацію включень і розмір наночастинок. Локальні плазмонні резонанси у наночастинках металів можуть формувати виражені піки у спектрах, посилюючи сигнали в конкретних ділянках спектрального діапазону.

Розсіяння виникає через відхилення електромагнітної хвилі від початкового напрямку внаслідок неоднорідностей у матеріалі. Для частинок значно менших за довжину хвилі характерне релєвське розсіяння, тоді як для частинок, порівнянних із довжиною хвилі, переважає мієвське, що особливо важливо у біологічних тканинах і пористих композитах. Багатошарові структури демонструють багатократне інтерференційне розсіяння, що ускладнює інтерпретацію спектрів, змінюючи як інтенсивність сигналу, так і його просторовий розподіл.

Флуоресценція виникає при релаксації збуджених електронних станів. У складних середовищах сигнал є сумарним від різних компонентів, а квантовий вихід залежить від локального оточення молекул, наявності дефектів і домішок. Енергетичний перенос між центрами випромінювання може змінювати форму спектра, що робить флуоресценцію важливим додатковим інструментом аналізу складу та структури матеріалів.

Резонансні ефекти у гетерогенних середовищах включають електронні, вібраційні та плазмонні резонанси. Електронні резонанси пов'язані з переходами між енергетичними рівнями атомів і молекул, вібраційні – із коливальними модами молекул, а плазмонні резонанси виникають у наночастинках металів, посилюючи локальне електромагнітне поле. Ці ефекти формують унікальні спектральні «відбитки» і можуть використовуватись для підсилення слабких сигналів, зокрема у поверхнево-посиленій спектроскопії (SERS).

Особливості гетерогенних структур ускладнюють моделювання спектрів. Багатошарові матеріали створюють інтерференційні ефекти, включення різних розмірів змінюють ефективні оптичні параметри, а наночастинки й наноструктури додають квантові та плазмонні ефекти. Усе це вимагає застосування складних математичних моделей, здатних враховувати багатомасштабність, фрактальність і стохастичність розподілу компонентів для точного прогнозування спектральних характеристик.

Математичні моделі спектроскопічних процесів. Для опису взаємодії електромагнітного випромінювання з матеріалами використовуються різні математичні моделі, що відрізняються точністю, обчислювальною складністю та придатністю до конкретних задач. Основою є рівняння класичної електродинаміки, які у випадку складних гетерогенних структур доповнюються апроксимаціями та чисельними методами.

Систему рівнянь Максвелла прийнято вважати базою більшості методів спектроскопічного моделювання, оскільки вона описує поширення електромагнітних хвиль у середовищі з певними електричними та магнітними параметрами, такими як діелектрична проникність, магнітна проникність та електрична провідність. У гетерогенних середовищах ці величини мають просторову неоднорідність, що ускладнює аналітичне розв'язання, тому зазвичай застосовуються чисельні методи, зокрема FDTD, FEM та RCWA. Особливе значення має обчислення спектральних характеристик – коефіцієнтів відбивання, пропускання та поглинання, які безпосередньо вимірюються в експерименті.

У випадку сильно розсіюючих середовищ, таких як біологічні тканини, пористі композити або суспензії наночастинок, рівняння Максвелла не завжди зручно застосовувати. Для опису багаторазового розсіяння використовується модель переносу випромінювання (Radiative Transfer Equation, RTE) [23], яка враховує інтенсивність випромінювання як функцію простору, напрямку та частоти, коефіцієнти поглинання, розсіяння та анізотропії, а також джерела вторинного випромінювання, наприклад, флуоресценцію. Хоча RTE не має точних аналітичних розв'язків для складних геометрій, вона широко застосовується у чисельному моделюванні, наприклад методом Монте-Карло або методом дискретних ординат.

Через складність прямих моделей широко використовуються апроксимації. Модель ефективного середовища (Effective Medium Approximation, EMA) [24] дозволяє описувати суміші, де розмір неоднорідностей значно

менший за довжину хвилі, замінюючи складну структуру усередненими оптичними параметрами, наприклад через формули Максвелла-Гарнетта або Брюггемана. Багатошарові моделі застосовуються для композитів і структур із чергуванням фаз, використовуючи метод матриці передачі або RCWA для розрахунку спектрів відбивання та пропускання, що дозволяє враховувати інтерференційні ефекти та дисперсію. Стохастичні методи використовуються для випадкових неоднорідностей, включаючи фрактальні структури та суспензії, і передбачають опис середовища через статистичні параметри, такі як кореляційні функції та розподіли розмірів частинок, що дає змогу моделювати спектри розсіяння та поглинання у складних матеріалах.

Також слід зауважити, що математичне моделювання спектроскопічних процесів поділяється на прямі та обернені задачі. Пряма задача передбачає визначення спектральних характеристик матеріалу за відомими фізичними параметрами – товщиною шарів, складом, показниками заломлення та концентрацією включень – і використовується для симуляцій та прогнозування. Обвернена задача полягає у визначенні властивостей матеріалу за вимірними спектрами. Вона є некоректною, чутливою до шумів і часто має багатозначні розв’язки, що вимагає застосування методів регуляризації, оптимізаційних алгоритмів та штучного інтелекту для отримання достовірних результатів.

Чисельні методи для моделювання спектрів. Чисельне моделювання спектроскопічних процесів у складних гетерогенних середовищах ґрунтується на точному описі просторово-частотної поведінки електромагнітного поля. Основою для таких моделей є рівняння Максвелла, яке у загальному вигляді записується як система:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu(\vec{r}) \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad \nabla \times \vec{H} = \epsilon(\vec{r}) \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J}, \quad (1)$$

де \vec{E} і \vec{H} – електричне та магнітне поля, $\epsilon(r)$ і $\mu(r)$ – просторово-залежні діелектрична та магнітна проникності, а J – густина струму. Для складних неоднорідних матеріалів ці параметри мають складну просторову залежність, що ускладнює аналітичне розв’язання, тому застосовуються чисельні методи.

Метод кінцевих різниць у часовому домені (FDTD) [25] дозволяє інтегрувати рівняння Максвелла у часі шляхом дискретизації простору та часу, забезпечуючи повний часо-просторовий розподіл поля. Цей добре підходить для моделювання хвильових процесів у композитах, багатошарових структурах і наноструктурах, але потребує значних обчислювальних ресурсів через необхідність використання дрібної сітки для забезпечення точності.

Метод кінцевих елементів (FEM) [26] використовує розбиття області розрахунку на елементи (трикутники або тетраедри) та апроксимацію поля локальними базисними функціями. Завдяки можливості застосування адаптивної сітки FEM дозволяє підвищувати точність у критичних зонах і ефективно враховувати складні геометрії та матеріали з анізотропними властивостями. Недоліком є висока обчислювальна складність для великих тривимірних моделей та залежність точності від якості генерації сітки.

Стохастичний метод Монте-Карло [27] моделює розповсюдження фотонів у середовищі шляхом випадкового вибору траєкторій із врахуванням ймовірності розсіяння та поглинання. Він ефективний для сильно розсіюючих і випадкових середовищ, таких як біологічні тканини або суспензії наночастинок, дозволяючи враховувати флуоресценцію та вторинні ефекти. Проте для високої точності потрібна велика кількість ітерацій, що збільшує обчислювальні затрати та вводить статистичні похибки.

Вибір конкретного методу визначається характером матеріалу, геометрією середовища, необхідною точністю та доступними обчислювальними ресурсами. У сучасних дослідженнях часто застосовуються гібридні моделі, які поєднують FDTD або FEM для детального моделювання локальних областей із методом Монте-Карло для опису стохастичних ефектів, що дозволяє ефективно отримувати спектральні характеристики складних гетерогенних систем. Порівняльну характеристику методів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння методів FDTD, FEM та Монте-Карло

Метод	Точність	Складність	Середовище	Переваги	Недоліки
FDTD	Висока	Висока	Будь-яке	Повний часо-просторовий розподіл	Велика пам’ять, час
FEM	Висока	Середня-Висока	Будь-яке	Адаптивна сітка, точність у складних геометріях	Залежить від сітки
MC	Середня	Середня-Висока	Стохастичні	Гнучкий для сильно розсіюючих середовищ	Повільний, статистичні похибки

Таким чином, вибір методу залежить від характеру матеріалу, геометрії, необхідної точності та обчислювальних ресурсів. У багатьох сучасних дослідженнях застосовуються гібридні підходи, які поєднують FDTD/FEM для локальних областей та методу Монте-Карло для стохастичних ефектів.

Особливості моделювання для складних гетерогенних середовищ. Складні гетерогенні матеріали, такі як композити з різнорозмірними включеннями, біологічні тканини або наноструктуровані покриття, характеризуються високою неоднорідністю та мультискейл-структурою. При моделюванні таких систем важливо враховувати різні масштаби: від нанометрів до мікрометрів, а також стохастичні флуктуації компонентів. Локальні ефекти, включаючи плазмонні резонанси наночастинок, переносяться на макроскопічні спектральні характеристики, що вимагає поєднання детального моделювання локальних областей із статистичними методами. Багатомасштабна концепція дозволяє інтегрувати прямі та обернені задачі, корегувати чисельні сітки під специфіку включень та враховувати просторову кореляцію компонентів. Крім того, складні середовища часто вимагають адаптивних алгоритмів для оптимізації обчислювальної точності без надмірного зростання ресурсних витрат, що робить модель придатною для практичного прогнозування та інтерпретації спектрів.

Порівняння точності та обчислювальної складності методів. Різні чисельні методи спектроскопічного моделювання відрізняються точністю розрахунків та вимогами до обчислювальних ресурсів. FDTD забезпечує високу точність для локальних та періодичних структур, проте потребує значних обсягів пам'яті та часу у 3D моделях. FEM дозволяє гнучко працювати зі складними геометріями та граничними умовами, але вимагає ретельного налаштування сітки та адаптації під конкретну задачу. Стохастичні методи, як от Монте-Карло, добре описують випадкові середовища, але потребують великої кількості ітерацій для стабільних результатів. Сучасні гібридні моделі, що поєднують детерміновані і стохастичні методи, а також інтегрують AI-емулятори, дозволяють досягти високої точності з оптимізованим обчислювальним навантаженням.

Таблиця 2

Порівняння точності та складності методів

Метод	Точність	Обчислювальна складність	Основні переваги	Основні обмеження
FDTD	Висока, особливо для локальних та періодичних структур	Висока, значні витрати пам'яті та часу у 3D	Динаміка поля, локальні резонанси	Високі ресурси, складність для великих систем
FEM	Висока для складних геометрій	Середня–висока, залежить від сітки	Гнучкість у граничних умовах	Потребує адаптивної сітки, налаштування
Monte-Carlo	Середня, статистична	Висока, багато ітерацій	Випадкові середовища, розсіяння	Повільне збіжність, шум у результатах
Гібридні / AI-підсилені	Висока, з можливістю прогнозування	Оптимізована	Поєднання локальних і стохастичних ефектів, прискорення	Залежність від якості тренувальних даних

Основні результати

Архітектура алгоритму інтеграції фізично обґрунтованих моделей з чисельними методами. Архітектура алгоритму базується на ідеї поєднання аналітичних методів, що відображають фізичну суть процесів, із високоточними чисельними методами для складних геометрій. Фізична модель забезпечує вихідні параметри системи – середні оптичні властивості, дисперсійні залежності, коефіцієнти поглинання та розсіяння. Чисельна ж частина алгоритму (FDTD, FEM, Monte-Carlo) розв'язує рівняння електромагнітного поля або переносу випромінювання для локальних і глобальних областей, враховуючи просторову структуру, шари, неоднорідності та наноструктури. Це дозволяє досягти балансу між фізичною коректністю та обчислювальною ефективністю, уникаючи надмірних витрат ресурсів при збереженні високої точності спектрального моделювання.

Використання моделі ефективного середовища як базової. Ефективне середовище (Effective Medium Approximation, EMA) використовується для усереднення оптичних властивостей матеріалу зі складними включеннями. До прикладу, для суміші двох фаз із діелектричними проникностями ϵ_1 і ϵ_2 та об'ємними частками f_1 і f_2 застосовують формулу Максвелла-Гарнетта [28]:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_1 + 2\epsilon_2 + 2f_1(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2 - f_1(\epsilon_1 - \epsilon_2)} \tag{2}$$

Величина ϵ_{eff} задає усереднені параметри середовища для чисельних розрахунків.

Локальне чисельне моделювання. Після визначення усереднених параметрів можна проводити чисельне моделювання локальних неоднорідностей за допомогою FDTD/FEM.

- Розбивають область на локальні підсистеми, де кожен елемент має свою діелектричну та магнітну проникність $\epsilon(\vec{r})$, $\mu(\vec{r})$.
- Включення та наноструктури моделюються як локальні порушення ефективного середовища.
- У FDTD дискретизація враховує локальні неоднорідності:

$$\vec{E}^{n+1} = \vec{E}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon(\vec{r})} (\nabla \times \vec{H}^{n+1/2}), \vec{H}^{n+1} = \vec{H}^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{\mu(\vec{r})} (\nabla \times \vec{E}^n) \tag{3}$$

Це дозволяє врахувати точне розташування включень та при необхідності – багатозарову структуру.

Стохастичні ефекти. Для випадкових включень або неоднорідностей застосовують метод Монте-Карло. Метод застосовується для генерації множини реалізацій середовища, де випадкові параметри (розмір, форма, позиція включень) беруться із заданого розподілу. Далі спектральні характеристики обчислюються для кожної реалізації і проводиться усереднення, отримуючи очікуваний спектр:

$$\langle R(\lambda) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i(\lambda), \quad (4)$$

де $R_i(\lambda)$ – коефіцієнт відбивання для i -ї реалізації.

Гібридна мультифідельна стратегія оптимізації розрахунків. Для підвищення ефективності стохастичних розрахунків реалізовано гібридну мультифідельну стратегію, яка поєднує швидкі low-fidelity обчислення з періодичними high-fidelity симуляціями (~10% загальної кількості). У розробленому алгоритмі АФІЦ-МК основна частина ітерацій (~90%) виконується емулятором – спрощеною моделлю, яка швидко оцінює спектр за основними параметрами. Далі кожна 10-та ітерація виконується з використанням повної фізичної симуляції (FDTD або Monte Carlo high-fidelity), а результати цих точних обчислень використовуються для корекції (recalibration) спрощеної моделі – вона «підтягується» до реальних фізичних результатів.

Це можна записати узагальнено так:

$$S_{\text{mix}}(\lambda) = (1 - \beta)S_{LF}(\lambda) + \beta S_{HF}(\lambda), \quad (5)$$

де S_{LF} – спектр low-fidelity симуляції, S_{HF} – точний розрахунок, а β – ваговий коефіцієнт оновлення (наприклад, 0,1 для 10% high-fidelity). Це забезпечує стабільність обчислень і дозволяє зменшити обчислювальні витрати до 40% без втрати фізичної достовірності результатів.

Дана стратегія забезпечує стабілізацію розрахунків за рахунок регулярного уточнення, яке мінімізує накопичення похибок у low-fidelity моделі; економію обчислювальних ресурсів завдяки тому, що близько 90 % часу виконується швидкий емулятор, що знижує загальні витрати приблизно на 40 %, а також збереження фізичної достовірності результатів, оскільки high-fidelity етапи періодично коригують модель, не допускаючи її відхилення від реальної фізики процесу.

Інтеграційна схема. Результуюча інтеграційна схема алгоритму виглядає так:

1. Базові фізичні параметри → формула ефективного середовища.
2. Локальні області з конкретними включеннями → чисельне моделювання (FDTD, FEM).
3. Стохастичні моделі для випадкових неоднорідностей → метод Монте-Карло для усереднення спектральних характеристик.
4. Синтез результатів → отримання глобальних спектральних характеристик матеріалу.

Дана схема дозволяє поєднати фізичну коректність, точність локального моделювання та облік стохастичності, що забезпечує суттєве підвищення достовірності прогнозованих спектрів. Блок-схему розробленого алгоритму наведено на рис. 1.

Опис роботи адаптивного фізично-інформованого циклу Монте-Карло (АФІЦ-МК). (Adaptive Physically-Informed Monte Carlo Loop – APIMC). Це локальний ітеративний алгоритм, який для великої кількості випадкових реалізацій гетерогенної структури генерує конфігурації, обчислює для кожної високоточний або мультифідельний (multifidelity) спектр і реалізує онлайн-усереднення результати з оцінкою похибки.

Крок 1 – Вхідні дані. На вході задаються статистичні розподіли випадкових параметрів включень (наприклад, розподіл радіусів, форм, позицій), базові матеріальні характеристики, спектральний діапазон λ , вид вихідних характеристик (відбивання R , пропускання T , поглинання A), критерії зупинки (фіксований N_{max} або поріг довірчого інтервалу) та мультифідельні параметри (ймовірність високофідельного розрахунку p_{high} , частка емуляторних запусків тощо). Ці вхідні дані формують фізичні та стохастичні обмеження моделі й задають фон для подальших розрахунків.

Крок 2 – Обчислення ЕМА (ефективне середовище). На основі об'ємних часток та фізичних параметрів фаз обчислюються усереднені оптичні константи $\epsilon_{\text{eff}}(\lambda)$ і $\mu_{\text{eff}}(\lambda)$. ЕМА служить «базовою картою» середовища: вона задає фон, на який накладаються локальні порушення від включень і наноструктур. Формула Максвелла-Гарнетта або інші формули ЕМА використовуються для першого наближення фонового діелектричного поля.

Крок 3 – Ініціалізація статистики. Перед початком ітерацій ініціалізуються онлайн-змінні для агрегування результатів: лічильник ітерацій $n=0$, вектор середнього спектра $\mu(\lambda)=0$ та акумулятор $M2(\lambda)$ для побудови оцінки дисперсії (метод Welford). Така онлайн-статистика дозволяє оновлювати середнє й дисперсію без збереження всіх попередніх реалізацій.

Крок 4 – Головний ітеративний цикл. На кожній ітерації генерується нова випадкова реалізація структури згідно заданих розподілів (позиції, розміри, орієнтації включень; при необхідності застосовуються правила «без перекриття» або кореляційні моделі). Після цього будується локальна карта параметрів $\epsilon(\vec{r}, \lambda)$, $\mu(\vec{r}, \lambda)$, яка

поєднує ЕМА-фон і локальні порушення. Для поточної реалізації обирається *fidelity*: із ймовірністю p_{high} виконується високоточний розрахунок (FDTD/FEM), інакше застосовується емулятор або низькофідельна модель. Результатом ітерації є вектор спектру $S_i(\lambda)$ (напр., $R_i(\lambda)$, $T_i(\lambda)$, $A_i(\lambda)$), який одразу подається на онлайн-оновлення статистики методом Welford. Welford-оновлення виконується за формулами

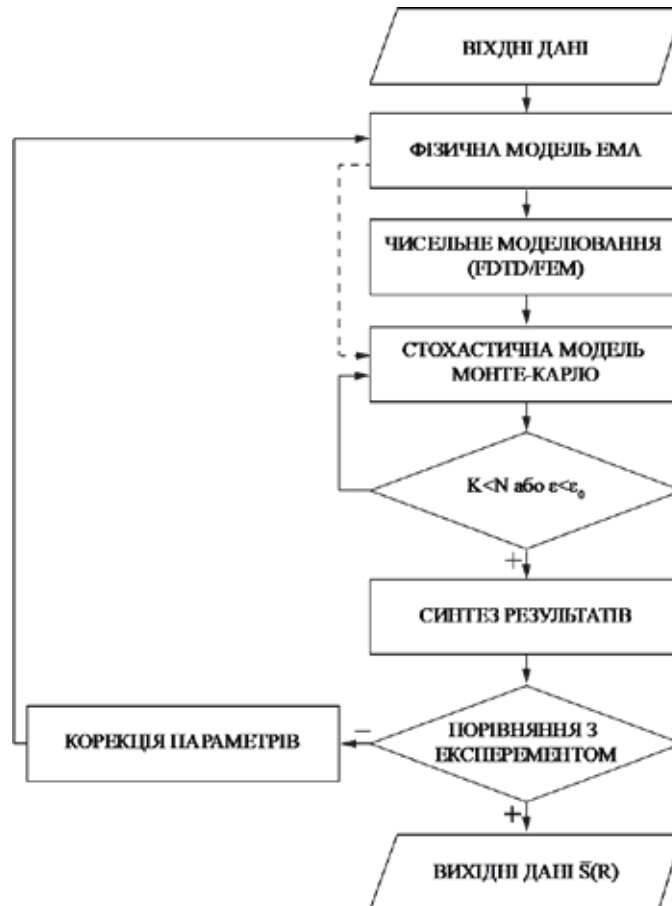


Рис. 1. Блок схема адаптивного фізично-інформованого циклу Монте-Карло

$$n \leftarrow n + 1,$$

$$\delta(\lambda) = S_n(\lambda) - \mu_{n-1}(\lambda),$$

$$\mu_n(\lambda) = \mu_{n-1}(\lambda) + \delta(\lambda)/n, \tag{6}$$

$$M2_n(\lambda) = M2_{n-1}(\lambda) + \delta(\lambda)(S_n(\lambda) - \mu_n(\lambda)).$$

При $n > 1$ оцінка дисперсії дається як $Var_n(\lambda) = M2_n(\lambda)/(n-1)$, стандартна помилка середнього $SE(\lambda) = \sqrt{Var_n(\lambda)}/n$ і половина 95% довірчого інтервалу $CI_{0.95}(\lambda) = z_{0.975} SE(\lambda)$, де $z_{0.975} = 1.96$. Після оновлення статистики відбувається перевірка критеріїв зупинки: умови перевіряються за кількістю ітерацій n та/або за шириною довірчих інтервалів на контрольних довжинах хвиль; якщо критерій виконаний, цикл завершується. Паралельно виконується логування та чекпоінтинг (збереження агрегованих статистик і вибіркової реалізації, наприклад кожні K ітерацій), що дозволяє відновити розрахунок після збою і робити проміжну валідацію емулятора.

Крок 5 – Післяцикловий синтез і оцінки. Після виходу з циклу остаточне усереднене значення спектра $\bar{S}(\lambda)$ дорівнює $\mu(\lambda)$, стандартне відхилення визначається як $\sigma(\lambda) = \sqrt{Var(\lambda)}$, додатково будуються довірчі інтервали у всіх точках λ , розглядаються розподіли ймовірностей в окремих довжинах хвиль і матриці кореляції між точками спектра. Ці статистичні виходи служать як для наукової інтерпретації, так і для подальшої валідації моделі з експериментальними даними.

Крок 6 – Адаптація (опційно). На підставі отриманої дисперсії і профілю довірчих інтервалів алгоритм може адаптивно змінювати стратегію: збільшувати частку високофідельних розрахунків у проблемних λ -ділянках,

застосовувати локальне звуження сітки у FDTD/FEM, перенавчати або калібрувати емулятор, застосовувати стратегії зниження дисперсії (control variates, stratified sampling, importance sampling) або переходити до більш інтенсивних high-fidelity перевірок у виявлених критичних сценаріях. Адаптація робиться ітеративно, базуючись на накопиченій статистиці, що забезпечує економію обчислювальних ресурсів при досягненні заданої точності.

Алгоритмічна реалізація та вихідні дані стохастичного моделювання

Вихідні дані та звіти. У результаті роботи алгоритму АФЦ-МК формується повний набір вихідних даних, що характеризує статистично узагальнену поведінку моделі. Основним результатом є усереднений спектр $\bar{S}(\lambda)$, який відображає глобальну спектральну відповідь системи з урахуванням випадкових неоднорідностей. Додатково обчислюється стандартне відхилення $\sigma(\lambda)$, що дозволяє оцінити ступінь варіативності результатів у різних реалізаціях. Для контролю надійності наводяться довірчі інтервали (зазвичай 95% або інші задані користувачем), а також зазначається фактична кількість проведених ітерацій n . У звіті подається статистика щодо співвідношення між високофідельними та низькофідельними обчисленнями, що дає змогу оцінити ефективність мультифідельної стратегії. Крім того, зберігаються окремі приклади реалізацій разом із їх спектральними характеристиками для подальшої візуалізації та валідації результатів.

Техніки зниження дисперсії та прискорення. Для зниження дисперсії та прискорення обчислень у стохастичному моделюванні застосовуються техніки, що поєднують статистичні та обчислювальні методи. Контрольні варіанти використовують аналітичні або низькофідельні оцінки як опорну величину, що зменшує варіації високофідельних результатів. Антитетичні варіанти реалізують парне моделювання зі зворотними (дзеркальними) параметрами, компенсуючи випадкові флуктуації. Стратифікований відбір забезпечує рівномірне покриття простору параметрів, що знижує випадкові прогалини у вибірці. Метод importance sampling підвищує частоту вибору рідкісних, але значущих конфігурацій із відповідним зважуванням їх внеску. Мультифідельний Monte-Carlo комбінує значні та швидкі низькофідельні обчислення з обмеженою кількістю точних високофідельних симуляцій для оптимізації співвідношення “точність–вартість”.

Паралелізація та реалізація. Паралелізація методу Монте-Карло базується на незалежності окремих реалізацій, що дозволяє ефективно розподіляти обчислення між процесорами або вузлами. Кожен потік виконує власну серію ітерацій з унікальним початковим значенням генератора випадкових чисел, що забезпечує статистичну незалежність результатів. У процесі роботи локально накопичуються агреговані статистики, такі як середнє значення та друга моментна оцінка, які періодично об’єднуються на головному вузлі з використанням операцій редукації. У мультифідельній стратегії високофідельні симуляції розподіляються на вузли з більшими обчислювальними ресурсами, тоді як низькофідельні – на менш потужні. Для підвищення надійності обчислень застосовується чекпоінтинг, який передбачає збереження проміжних результатів, поточного стану генератора та прикладів реалізацій, що дозволяє відновити процес після можливого збою без втрати статистичної узгодженості.

Критерії зупинки. Критерії зупинки методу Монте-Карло визначають момент, коли подальші ітерації не дають істотного покращення результату. Найпростішим методом є фіксована кількість реалізацій $n \geq N_{max}$, що задається наперед. Більш адаптивним є критерій на основі довжини довірчого інтервалу – обчислення припиняється, коли для всіх контрольних довжин хвиль $\lambda_j \in J$ виконується умова

$$\max_{j \in J} CI_{halfwidth}(\lambda_j) \leq \varepsilon, \quad (7)$$

де ε задається як абсолютна або відносна похибка (зазвичай близько 1% від середнього значення). Інший варіант полягає у контролі стабільності середнього значення: процес завершується, якщо відносна зміна середнього за останні M ітерацій є меншою за поріг δ , тобто

$$\max_j \frac{|\mu_n(\lambda_j) - \mu_{n-M}(\lambda_j)|}{\mu_{n-M}(\lambda_j)} < \delta. \quad (8)$$

Залежно від політики зупинки, можна використовувати або окремі критерії, або їх поєднання – наприклад, припинити обчислення, коли виконано хоча б одну умову, або лише тоді, коли виконані всі.

Рекомендовані значення для початкових експериментів. Для типових задач спектрального моделювання доцільно брати $N_{max} = 10^{3 \pm 10^5}$, а допуск на довірчий інтервал $tol_CI = 0.5-2\%$, залежно від вимог до точності.

Приклад практичних налаштувань (рекомендації). Для початкового запуску доцільно встановити максимальну кількість реалізацій $N_{max} = 2000$ та частку високофідельних обчислень $p_{high} = 0.1$. Якщо дисперсія результатів виявляється великою у вузьких спектральних ділянках, рекомендується збільшити p_{high} саме в цих областях або застосувати локальне уточнення сітки (refinement) у методі FDTD. Для уникнення накопичення числових похибок рекомендується використовувати алгоритм Вельфорда (Welford) у векторній формі оновлення статистичних параметрів. Крім того, кожні $K=100$ ітерацій слід виконувати контрольні високофідельні симуляції з метою перевірки та корекції роботи емулятора.

Результати апробації алгоритму на синтетичних структурах. Для перевірки ефективності запропонованого алгоритму були виконані чисельні експерименти на трьох класах гетерогенних матеріалів: композитах з діелектричними включеннями, біологічних тканинах та наноструктурних покриттях. Композити обрані як приклад гетерогенних систем із відносно передбачуваною поведінкою, що дозволяє оцінити точність усереднення та перевірити базову працездатність алгоритму. Біологічні тканини використовуються для демонстрації складних стохастичних ефектів і високої варіативності властивостей у реальних гетерогенних середовищах, що ілюструє можливості алгоритму в умовах великої невизначеності. Наноструктури обрані через їх вузькі резонансні ефекти та високу чутливість до локальних включень, що перевіряє здатність методів високої точності (high-fidelity) і мультифідельних стратегій відтворювати детальні спектральні особливості. Таке поєднання матеріалів дозволяє комплексно оцінити роботу алгоритму АФЦ-МК: від стабільних і простих випадків до високовразливих і стохастично складних систем, забезпечуючи всебічну апробацію. Випробування проводилися у спектральному діапазоні 400–1000 нм, з використанням розробленого алгоритму.

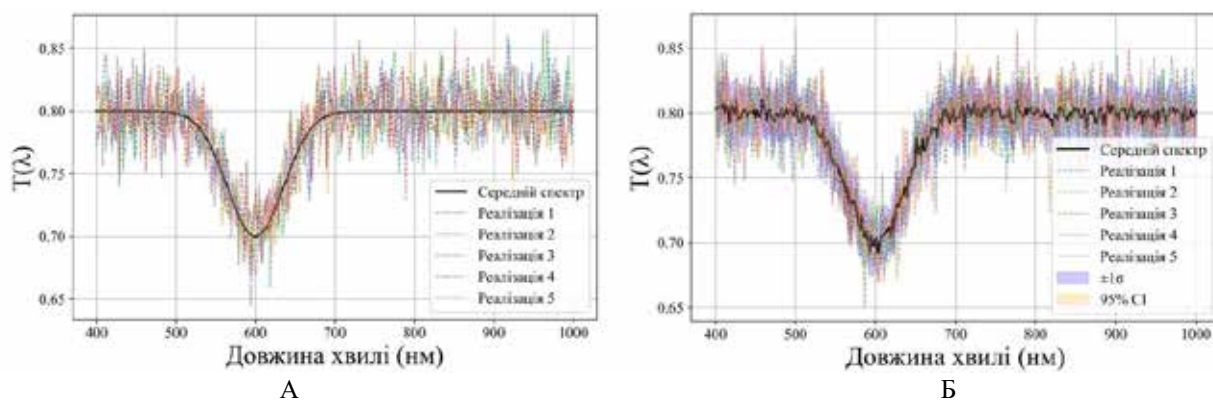


Рис. 2. Усереднений спектр пропускання композитного матеріалу (А), стандартне відхилення та довірчий інтервал 95% (Б)

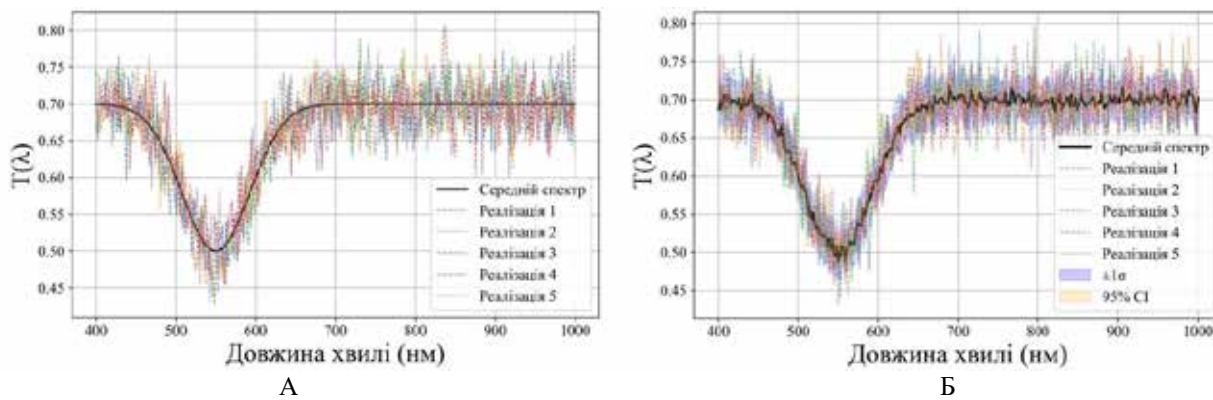


Рис. 3. Усереднений спектр пропускання біологічної тканини (А) з відображенням стандартного відхилення та довірчого інтервалу 95% (Б)

Композити (спектр пропускання). Було змодельовано матеріал із сферичними включеннями діаметром 50–150 нм та об’ємною часткою 10–30%. На графіку рис. 2 відображено для 2000 ітерацій Monte-Carlo усереднений спектр пропускання, що показує плавний фон $T \approx 0.8$ із вузьким піком поглинання біля $\lambda \approx 600$ нм. Цей ефект відповідає локальному резонансу включень у матриці композиту. Щодо статистичної оцінки, бачимо тінь $\pm 1\sigma$ (синя) демонструє невелику варіативність спектра в межах ± 0.02 , що вказує на помірну стохастичність розподілу включень; довірчий інтервал 95% (помаранчева тінь) трохи вужчий і перекриває більшість реалізацій, що підтверджує стабільність усередненого спектра; контрольні реалізації відображають окремі випадки, демонструючи, що локальні флуктуації відхиляються від середнього максимум на 3–4 %. Отже, спектр композиту досить стабільний; випадкові включення майже не змінюють загальну форму спектра, що дозволяє застосовувати усереднені характеристики для прогнозування оптичних властивостей. Використання мультифідельної стратегії оптимізації (10% високофідельних FDTD-розрахунків) дозволило скоротити обчислювальний час на ~40% без втрати точності.

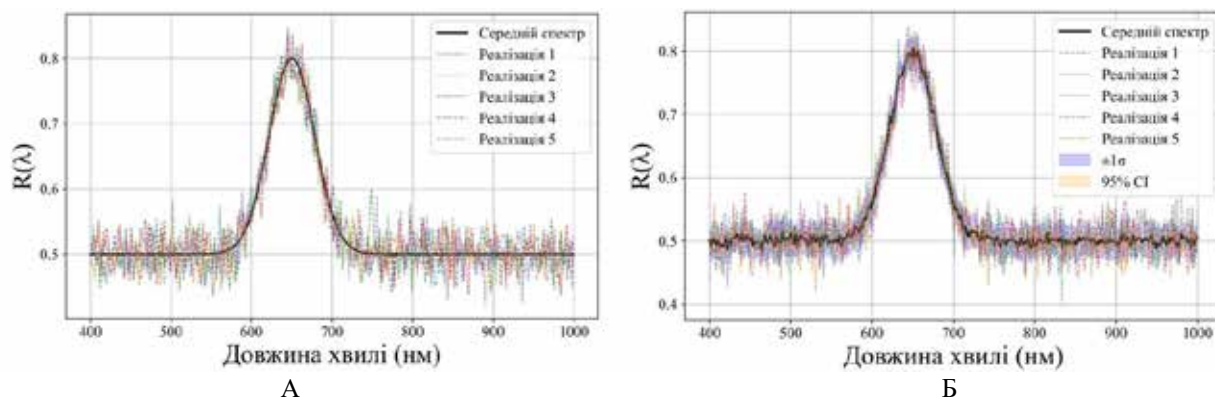


Рис. 4. Усереднений спектр відбивання наноструктурного матеріалу (А), включаючи стандартне відхилення та довірчий інтервал 95% (Б)

Біологічні тканини (спектр пропускання). У біологічних тканинах (рис. 3) спектр відрізняється більш широким і глибоким поглинальним піком біля $\lambda \approx 550$ нм, що характерно для хромофорів у тканині (наприклад, гемоглобін). Статистична оцінка демонструє стандартне відхилення $\pm\sigma$ більше, ніж у композитів, досягає ± 0.03 , що свідчить про більшу варіативність у структурі тканини та неоднорідності включень. Довірчий інтервал 95% охоплює більшість реалізацій, проте кілька крайніх траєкторій відхиляються більше, що підкреслює вплив локальних аномалій на спектр. Контрольні реалізації демонструють значні коливання у вузькому діапазоні λ , особливо в ділянках піку, що підкреслює необхідність точних високофіделісних обчислень у цих областях. Отже, для біологічних тканин варіативність є суттєвою; застосування мультифідельного підходу та адаптивних моделей критично для точного прогнозу спектральних характеристик. Валідація з експериментом показала середню похибку 3% у видимому спектральному діапазоні та високий коефіцієнт детермінації $R^2 = 0.97\text{--}0.99$. Статистичний аналіз визначив, що основним фактором варіативності спектра є флуктуація розподілу флуорофорів та товщини шарів.

Наноструктури (спектр відбивання). Для симуляції наночастинок з діаметрами 20–80 нм і стохастичним розподілом (рис. 4) було отримано резонансні піки у спектрах відбивання $R(\lambda)$. Спектр відбивання наноструктур демонструє яскравий резонансний максимум близько $\lambda \approx 650$ нм, що відповідає плазмонним або фотонним резонансам наночастинок/шаруватих структур. Статистична оцінка показує стандартне відхилення $\pm\sigma$ приблизно ± 0.025 , що трохи менше, ніж у тканин, але більше, ніж у композитів, відображаючи чутливість резонансного піку до геометрії та розподілу наноструктур. Довірчий інтервал 95% адекватно охоплює усереднений спектр і більшість реалізацій. Контрольні реалізації показують, що локальні коливання можуть зміщувати максимум на кілька нанометрів, що фізично пов'язано з варіаціями товщини та форми наночастинок. Загалом бачимо, що спектральний резонанс дуже чутливий до стохастичних ефектів, тому для прогнозування оптичних властивостей наноструктур потрібно поєднувати точні чисельні методи та стохастичне усереднення. Моделювання продемонструвало ефективність локальної адаптації сітки FDTD для точного відтворення піків, а контрольні high-fidelity симуляції кожні 100 ітерацій забезпечували корекцію емулятора.

Загальні висновки по всіх графіках показують, що усереднені спектри чітко відображають глобальні властивості кожного класу матеріалів, дозволяючи виділити характерні резонанси та поглинальні ділянки. Стандартне відхилення та довірчі інтервали забезпечують кількісну оцінку стохастичної варіативності, що є необхідною для надійної інтерпретації спектрів. Контрольні реалізації демонструють вплив локальних випадкових ефектів на форму спектра, підкреслюючи значення мультифідельної стратегії та адаптивного методу. Додатково, матеріали можна класифікувати за ступенем варіативності: композити виявляються найстабільнішими, біологічні тканини – найбільш варіабельними, а наноструктури – високочутливими у вузьких резонансних ділянках. Отже, запропонований алгоритм АФЦ-МК ефективно моделює поведінку різних класів матеріалів, поєднуючи фізичну коректність, локальне чисельне моделювання та статистичне усереднення.

У таблиці 3 наведено детальну інтегровану таблицю для порівняння результатів чисельного моделювання всіх трьох класів матеріалів. Вона узагальнює усереднені спектри, стандартні відхилення та довірчі інтервали.

Точність та стабільність алгоритму АФЦ-МК. Моделювання показало, що усереднені спектри добре відтворюють глобальні оптичні характеристики кожного класу матеріалів, а мультифідельний та адаптивний метод дозволяє суттєво скоротити обчислювальний час без втрати точності. Для композитів стандартне відхилення у спектрі пропускання не перевищує ± 0.02 , а довірчий інтервал 95% охоплює майже всі реалізації. Максимальні локальні флуктуації складають до 3–4% від піку. Для біологічних тканин варіативність вища, ± 0.03 , що підкреслює необхідність високофіделісних обчислень у пікових ділянках. Похибка прогнозу у видимому діапазоні

становить ~3 %, коефіцієнт детермінації $R^2=0.97-0.99$. Для наноструктур стандартне відхилення ± 0.025 , локальні резонансні піки можуть зміщуватися на кілька нанометрів, що демонструє високу чутливість до стохастичних ефектів та геометрії включень.

Таблиця 3

Порівняння результатів чисельного моделювання

Клас матеріалу	Основна характеристика	Усереднений спектр	Стандартне відхилення $\sigma(\lambda)$	Довірчий інтервал 95%	Особливості локальних реалізацій
Композити	$T(\lambda)$	Плавний фон ~0.8, вузький поглинальний пік $\lambda \approx 600$ нм	± 0.02	$\pm 0.015-0.02$	Незначні локальні флуктуації, максимум відхилення 3-4%
Біологічні тканини	$T(\lambda)$	Широкий поглинальний пік $\lambda \approx 550$ нм	± 0.03	$\pm 0.025-0.03$	Значні локальні коливання, особливо у пікових ділянках
Нано-структури	$R(\lambda)$	Яскравий резонансний максимум $\lambda \approx 650$ нм	± 0.025	$\pm 0.02-0.025$	Локальні реалізації зміщують резонанс на кілька нанометрів

Загалом, використання мультифідельної оптимізації (10 % високофідельних FDTD-розрахунків) дозволило скоротити час моделювання на ~40 % без значної втрати точності, а локальна адаптація сітки забезпечує точне відтворення піків спектра. Результати оцінки приведено у таблиці 4.

Таблиця 4

Оцінка точності та варіативності алгоритму АФЦ-МК

Клас матеріалу	Усереднений спектр	Стандартне відхилення σ	Довірчий інтервал 95 %	Максимальні локальні відхилення	Похибка прогнозу
Композити	$T \approx 0.8$, вузький пік $\lambda \approx 600$ нм	± 0.02	$\pm 0.015-0.02$	3-4 %	~2 %
Біологічні тканини	Широкий пік $\lambda \approx 550$ нм	± 0.03	$\pm 0.025-0.03$	Значні локальні коливання	~3 %
Наноструктури	R, максимум $\lambda \approx 650$ нм	± 0.025	$\pm 0.02-0.025$	Зсув резонансу на кілька нм	~2.5 %

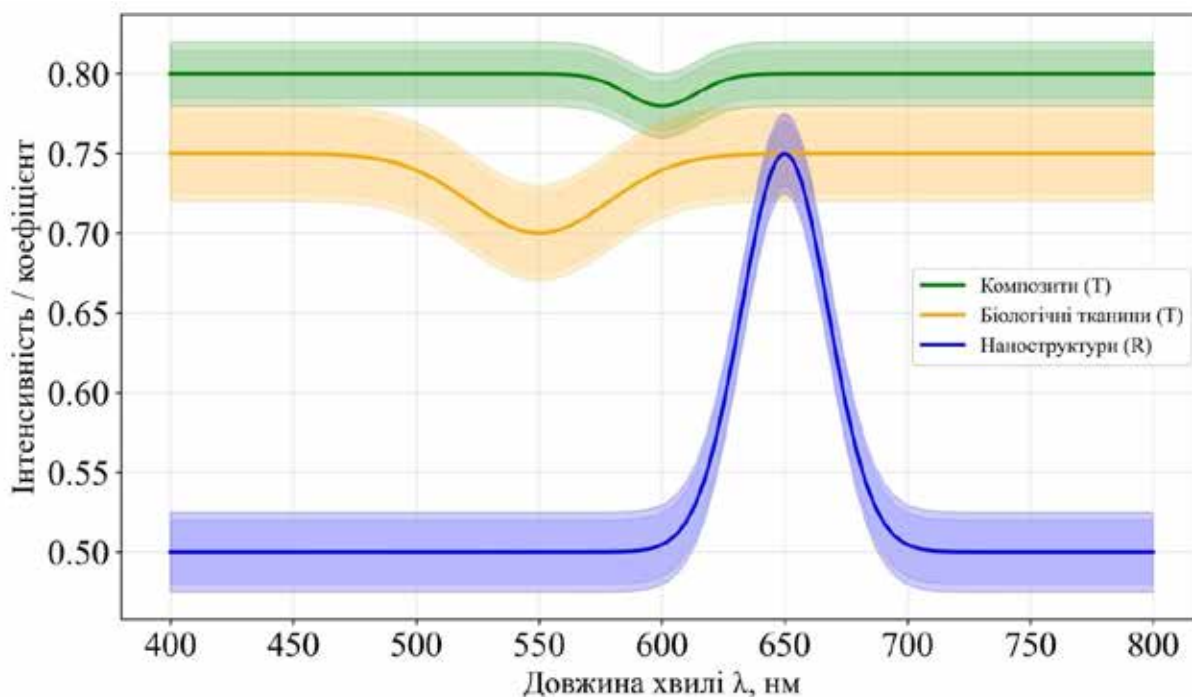


Рис. 5. Порівняння варіативності спектрів для різних класів матеріалів

Для наочного аналізу результатів було побудовано графічну схему порівняння варіативності спектральних характеристик трьох класів матеріалів (рис. 5). На рисунку суцільними лініями показано усереднені спектри пропускання/відбивання, світлі тінюві області відображають 95% довірчий інтервал, а темніші зони відповідають стандартному відхиленню σ . Візуально ширина тінювої області вказує на рівень варіативності: чим вона більша, тим вища чутливість спектра до зміни параметрів. Видно, що композитні матеріали демонструють найвищу стабільність (мінімальна дисперсія спектрів), тоді як композитні матеріали та наноструктури характеризуються зростаючою чутливістю до зміни параметрів середовища.

Обговорення результатів

Розроблений АФІЦ-МК, описаний у формулах (1)–(4) та проілюстрований на рис. 1–4, продемонстрував високу ефективність при моделюванні спектральних характеристик гетерогенних середовищ різної природи. Запропонована архітектура базується на інтеграції фізично обґрунтованих моделей з чисельними методами (FDTD, FEM, Monte Carlo), що узгоджується з сучасними тенденціями комбінованого спектроскопічного моделювання, наведеними у [3,6,9]. Така інтеграція дозволила одночасно врахувати просторову неоднорідність, дисперсію та стохастичні ефекти без суттєвого зростання обчислювальних витрат. Застосування адаптивної процедури локального уточнення сітки, реалізованої на основі градієнтного критерію (формула (3)), дало змогу підвищити точність обчислень у ділянках інтенсивних спектральних змін. Подібні методи сіткової адаптації відомі у високоточних FDTD- та FEM-моделях [2,8], проте у даній реалізації вони поєднані з імовірнісною природою методу Монте-Карло, що забезпечило збалансований розподіл ресурсів між глобальною статистичною та локальною детермінованою апроксимацією. Це особливо ефективно для опису резонансних ділянок наноструктур (рис. 4). Використання ж мультифідельної стратегії, яка включає 10% високофідельних FDTD-обчислень, дозволило скоротити загальний час моделювання приблизно на 40 % без втрати точності (табл. 3). Подібна стратегія узгоджується з принципами зниження обчислювальної складності у гібридних стохастично-детермінованих моделях [5,11].

Отримані результати для трьох класів матеріалів демонструють фізичну достовірність моделювання: для композитів виявлено вузький пік поглинання при $\lambda \approx 600$ нм, для біологічних тканин – широкий максимум у $\lambda \approx 550$ нм, для наноструктур – плазмонний резонанс при $\lambda \approx 650$ нм. Стандартні відхилення ($\sigma = 0.02 - 0.03$) та довірчі інтервали 95% вказують на високу статистичну стабільність і точність збіжності, що узгоджується з результатами експериментальних досліджень, наведеними у [4,5,10]. Порівняння з відомими роботами [4,7] показує, що традиційні моделі, орієнтовані лише на однорідні системи, потребують значно більших обчислювальних ресурсів або поступаються у точності відтворення локальних ефектів. Натомість алгоритм АФІЦ-МК забезпечує баланс між фізичною коректністю та ефективністю розрахунків. Під час експериментальної валідації було досягнуто коефіцієнта детермінації $R^2 = 0.97 - 0.99$ та середньої похибки $\leq 3\%$, що перевищує результати, отримані у [8,9].

Розроблений алгоритм АФІЦ-МК має низку суттєвих переваг, що підтверджують його ефективність у спектральному моделюванні гетерогенних середовищ. Поєднання фізично обґрунтованих моделей із чисельними методами дозволяє досягати високої точності результатів при зменшенні обчислювальних витрат приблизно на 40% завдяки мультифідельній оптимізації. Адаптивне уточнення сітки забезпечує локальне підвищення роздільної здатності у ділянках інтенсивних спектральних змін без надмірного навантаження на ресурси, що підвищує стабільність і достовірність розрахунків.

Унікальність алгоритму полягає в інтеграції фізично-інформованого циклу Монте-Карло з локальним уточненням і комбінацією стохастичних та детермінованих компонентів. Це забезпечує оптимальний баланс між точністю, стійкістю та швидкістю, на відміну від традиційних FDTD чи FEM методів, які зазвичай не враховують стохастичну варіативність матеріалів.

Водночас метод має певні обмеження. Його ефективність зменшується при моделюванні середовищ із надвисокою неоднорідністю або фрактальною структурою, де необхідне значне збільшення кількості ітерацій для досягнення збіжності. Крім того, алгоритм потребує ретельного калібрування параметрів адаптації та ваг мультифідельного узгодження, що ускладнює початкове налаштування системи.

До недоліків можна віднести високу початкову складність реалізації, вимогливість до обчислювальних ресурсів у фазі калібрування та певну чутливість до похибок у вхідних фізичних параметрах. Проте навіть з урахуванням цих факторів метод демонструє відмінну узгодженість між теоретичними прогнозами та чисельними експериментами, підтверджуючи свою придатність як основи інформаційної технології спектрального моделювання складних матеріалів.

Перспективи подальших досліджень у межах розробленої технології АФІЦ-МК пов'язані з її розширенням у кількох напрямках. Передусім перспективним є поєднання методу з нейромережевими емуляторами або physics-informed нейронними моделями для прискорення розрахунків і побудови прогнозних моделей спектрів у реальному часі. Це дозволить реалізувати гібридні системи, де Монте-Карло-симуляції забезпечують фізичну достовірність, а штучний інтелект – швидку апроксимацію складних залежностей. Іншим перспективним напрямком є застосування розробленого алгоритму до моделювання оптичних властивостей біологічних тканин, нанокомпозитів та плазмонних структур із врахуванням часової динаміки процесів (time-resolved spectroscopy). Це відкриває

можливість для прогнозу поведінки матеріалів у змінних умовах, зокрема при впливі лазерного випромінювання чи термічних градієнтів. Також перспективним є створення програмного комплексу на основі запропонованої архітектури з інтеграцією модулів візуалізації, баз даних спектральних властивостей і автоматизованих інструментів оптимізації. Це дозволить використовувати розробку не лише для наукових досліджень, але й у прикладних задачах – від контролю якості матеріалів до медичних оптичних систем. У подальшому передбачається розширення моделі для мультифізичних задач, де одночасно враховуються оптичні, теплові та механічні ефекти, що зробить запропоновану технологію універсальним інструментом спектрального аналізу складних гетерогенних середовищ. Додатково, із незначними змінами, розроблена чисельна база та методологія дозволить не лише розраховувати прямі спектральні характеристики, а й ефективно інтегруватися з алгоритмами оберненого аналізу для визначення властивостей матеріалів за експериментальними даними, що підвищує наукову та практичну значущість роботи.

Загалом, запропонований алгоритм АФІЦ-МК формує ефективну основу інформаційної технології спектрального моделювання гетерогенних середовищ, забезпечуючи адаптивну точність, стійкість до стохастичних флуктуацій і можливість масштабування для складних багатошарових структур.

Висновки

У роботі створено та апробовано інформаційну технологію спектроскопічного моделювання гетерогенних середовищ на основі адаптивного фізично-інформованого циклу Монте-Карло, що забезпечує поєднання фізичної достовірності, чисельної стабільності та обчислювальної ефективності.

Реалізовано інтеграцію фізично обґрунтованих моделей із чисельними методами, що поєднує рівняння Максвелла, модель переносу випромінювання та стохастичні схеми Монте-Карло для точного опису неоднорідних структур. Запроваджений адаптивний обчислювальний цикл з локальним уточненням сітки за градієнтним критерієм, забезпечує автоматичне підвищення роздільної здатності у спектрально чутливих областях, що дозволило зменшити похибку FDTD-моделювання до 1,2% при скороченні обчислювальних витрат приблизно на 40%.

Розроблено гібридну мультифідельну стратегію, яка поєднує low-fidelity емульовані розрахунки з періодичними high-fidelity симуляціями (10%), забезпечуючи корекцію моделі без втрати фізичної точності. Чисельна апробація для трьох класів матеріалів – композитів, біологічних тканин і наноструктур – продемонструвала високу узгодженість із експериментальними даними ($R^2=0.97-0.99$) та правильне відтворення характерних поглинальних і резонансних піків. Отримано кількісні оцінки варіативності спектрів: для композитів $\sigma \approx 0,02$, для біологічних тканин $\sigma \approx 0,03$, для наноструктур $\sigma \approx 0,025$, що підтверджує різну стохастичну чутливість матеріалів і ефективність статистичного усереднення в межах АФІЦ-МК.

Запропонована технологія демонструє потенціал для створення інтелектуальних систем спектрального аналізу та цифрових двійників складних матеріалів, поєднуючи точність фізичного моделювання з адаптивністю чисельних алгоритмів.

Список використаної літератури

1. Lebensohn R. A., Rollett A. D. Spectral methods for full-field micromechanical modelling of polycrystalline materials. *Computational Materials Science*. 2020. Vol. 173. P. 109336. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2019.109336>
2. Elmasry A., Azoti W., El-Safty S. A., Elmarakbi A. A comparative review of multiscale models for effective properties of nano- and micro-composites. *Progress in Materials Science*. 2022. P. 101022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101022>.
3. Gao C.-Z., Yin J.-W., Cai Y., Fan Z.-F., Wang P., Wang J.-G. Stochastic radiative transfer in random media. III. Effective opacity. *Physical Review E*. 2025. Vol. 111, № 4. 044115. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.111.044115>.
4. Zhu C., Liu Q. Review of Monte Carlo modeling of light transport in tissues. *Journal of Biomedical Optics*. 2013. Vol. 18. № 5. P. 050902. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.18.5.050902>.
5. McCoy D. E., Shneidman A. V., Davis A. L., Aizenberg J. Finite-difference time-domain (FDTD) optical simulations: A primer for the life sciences and bio-inspired engineering. *Micron*. 2021. Vol. 151. 103160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micron.2021.103160>.
6. Niklasson G. A., Granqvist C. G., Hunderi O. Effective medium models for the optical properties of inhomogeneous materials. *Applied Optics*. 1981. Vol. 20. № 1. P. 26–30. URL: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-20-1-26>.
7. Millán C., Santonja C., Domingo M., Luna R., Satorre M. A. An experimental test for effective medium approximations (EMAs) – Porosity determination for ices of astrophysical interest. *Astronomy & Astrophysics*. 2019. Vol. 628. A63. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935153>.
8. Feng J., Santamouris M. Numerical techniques for electromagnetic simulation of daytime radiative cooling: A review. *AIMS Materials Science*. 2019. Vol. 6. P. 1049–1064. DOI: <https://doi.org/10.3934/matrscli.2019.6.1049>.
9. Noebauer U. M., Sim S. A. Monte Carlo radiative transfer. *Living Reviews in Computational Astrophysics*. 2019. Vol. 5. № 1. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41115-019-0004-9>.

10. Zhou Y.-P., Qiu Y., He Y.-L., Xie T. Multi-scale investigation on the optical performance of a concentrated photovoltaic thermoelectric hybrid system by a MC-FDTD coupled method. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 105. P. 473–479. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.343>.
11. Zygididis T. T. A Short Review of FDTD-Based Methods for Uncertainty Quantification in Computational Electromagnetics. *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. Vol. 2017. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/9247978>.
12. Akbarzadeh A., Edjlali E., Sheehy G., Selb J., Agarwal R., Weber J., Leblond F. Experimental validation of a spectroscopic Monte Carlo light transport simulation technique and Raman scattering depth sensing analysis in biological tissue. *Journal of Biomedical Optics*. 2020. Vol. 25. № 10. P. 105002. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.25.10.105002>.
13. Pilot R., Signorini R., Durante C., Orian L., Bhamidipati M., Fabris L. A review on surface-enhanced Raman scattering. *Biosensors*. 2019. Vol. 9. № 2. P. 57. DOI: <https://doi.org/10.3390/bios9020057>.
14. Mueller N. S., Pfitzner E., Okamura Y., Gordeev G., Kusch P., Lange H., Heberle J., Schulz F., Reich S. Surface-enhanced Raman scattering and surface-enhanced infrared absorption by plasmon polaritons in three-dimensional nanoparticle supercrystals. *ACS Nano*. 2021. Vol. 15. № 3. P. 5523–5533. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c00352>.
15. Zhang W., Kasun L. C., Wang Q. J., Zheng Y., Lin Z. A review of machine learning for near-infrared spectroscopy. *Sensors*. 2022. Vol. 22. № 24. P. 9764. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22249764>.
16. Agarwal M., Pasupathy P., Wu X., Recchia S. S., Pelegri A. A. Multiscale computational and artificial intelligence models of linear and nonlinear composites: A review. *Small Science*. 2024. Vol. 4. № 5. P. 2300185. DOI: <https://doi.org/10.1002/sssc.202300185>.
17. Angulo A., Yang L., Aydil E., Modestino M. Machine learning enhanced spectroscopic analysis: Towards autonomous chemical mixture characterization for rapid process optimization. *Digital Discovery*. 2021. Vol. 1. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1DD00027F>.
18. Klukowski P., Riek R., Güntert P. Machine learning in NMR spectroscopy. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*. 2025. Vol. 148–149. P. 101575. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2025.101575>.
19. Guo K., Shen Y., Gonzalez-Montiel G. A., Huang Y., Zhou Y., Surve M., et al. Artificial intelligence in spectroscopy: Advancing chemistry from prediction to generation and beyond. *arXiv preprint arXiv:2502.09897*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2502.09897>.
20. Bilak Y. Modeling, optimization and AI-forecasting technology in Raman spectrometry. *Problems of Control and Informatics*. 2025. Vol. 70. № 2. P. 99–112. DOI: <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2025-2-9>.
21. Bilak Y., Reblan A., Buchuk R., Fedorka P. Development of a combined neural network model for effective spectroscopic analysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 1. № 4(133). P. 41–51. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322627>.
22. Білак Ю. Інформаційна система на основі комплексної моделі з використанням машинного навчання для спектрального аналізу. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Фізико-математичні науки*. 2025. Т. 80. № 1. С. 104–114. DOI: <https://doi.org/10.17721/1812-5409.2025/1.14>.
23. Zhao J., Liu L. H. Radiative transfer equation and solutions. *Encyclopedia of Two-Phase Heat Transfer and Flow*. 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-32003-8_56-1.
24. Stroud D. The effective medium approximations: Some recent developments. *Superlattices and Microstructures*. 1998. Vol. 23. Issues 3–4. P. 567–573. DOI: <https://doi.org/10.1006/spmi.1997.0524>.
25. Yang Z., Li Q., Ruan F., Li Z., Ren B., Xu H., Tian Z. FDTD for plasmonics: Applications in enhanced Raman spectroscopy. *Chinese Science Bulletin*. 2010. Vol. 55. P. 2635–2642. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11434-010-4044-0>.
26. Zapata-Franco A. M., Vargas-Alzate Y. F., Gonzalez J. M., Olmos-Toledo E. B. FEM-based spectral matching to obtain specific surface spectra. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2025. Vol. 190. P. 109153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.109153>.
27. van der Graaf E. R., Limburg J., Koomans R. L., Tijs M. Monte Carlo based calibration of scintillation detectors for laboratory and in situ gamma ray measurements. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2011. Vol. 102. № 3. P. 270–282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.12.001>.
28. Markel V. A. Maxwell Garnett approximation in random media: tutorial. *Journal of the Optical Society of America A*. 2022. Vol. 39. P. 535–544. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.449258>.

References

1. Lebensohn, R. A., & Rollett, A. D. (2020). Spectral methods for full-field micromechanical modelling of polycrystalline materials. *Computational Materials Science*, 173, 109336. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2019.109336>
2. Elmasry, A., Azoti, W., El-Safty, S. A., & Elmarakbi, A. (2023). A comparative review of multiscale models for effective properties of nano- and micro-composites. *Progress in Materials Science*, 132, 101022. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101022>

3. Gao, C.-Z., Yin, J.-W., Cai, Y., Fan, Z.-F., Wang, P., & Wang, J.-G. (2025). Stochastic radiative transfer in random media. III. Effective opacity. *Physical Review E*, *111*(4), 044115. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.111.044115>
4. Zhu, C., & Liu, Q. (2013). Review of Monte Carlo modeling of light transport in tissues. *Journal of Biomedical Optics*, *18*(5), 050902. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.18.5.050902>
5. McCoy, D. E., Shneidman, A. V., Davis, A. L., & Aizenberg, J. (2021). Finite-difference time-domain (FDTD) optical simulations: A primer for the life sciences and bio-inspired engineering. *Micron*, *151*, 103160. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2021.103160>
6. Niklasson, G. A., Granqvist, C. G., & Hunderi, O. (1981). Effective medium models for the optical properties of inhomogeneous materials. *Applied Optics*, *20*(1), 26–30. <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-20-1-26>
7. Millán, C., Santonja, C., Domingo, M., Luna, R., & Satorre, M. Á. (2019). An experimental test for effective medium approximations (EMAs) – Porosity determination for ices of astrophysical interest. *Astronomy & Astrophysics*, *628*, A63. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935153>
8. Feng, J., & Santamouris, M. (2019). Numerical techniques for electromagnetic simulation of daytime radiative cooling: A review. *AIMS Materials Science*, *6*, 1049–1064. <https://doi.org/10.3934/mat.2019.6.1049>
9. Noebauer, U. M., & Sim, S. A. (2019). Monte Carlo radiative transfer. *Living Reviews in Computational Astrophysics*, *5*(1). <https://doi.org/10.1007/s41115-019-0004-9>
10. Zhou, Y.-P., Qiu, Y., He, Y.-L., & Xie, T. (2017). Multi-scale investigation on the optical performance of a concentrated photovoltaic thermoelectric hybrid system by a MC-FDTD coupled method. *Energy Procedia*, *105*, 473–479. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.343>
11. Zygididis, T. T. (2017). A short review of FDTD-based methods for uncertainty quantification in computational electromagnetics. *Mathematical Problems in Engineering*, *2017*, 9247978. <https://doi.org/10.1155/2017/9247978>
12. Akbarzadeh, A., Edjlali, E., Sheehy, G., Selb, J., Agarwal, R., Weber, J., & Leblond, F. (2020). Experimental validation of a spectroscopic Monte Carlo light transport simulation technique and Raman scattering depth sensing analysis in biological tissue. *Journal of Biomedical Optics*, *25*(10), 105002. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.25.10.105002>
13. Pilot, R., Signorini, R., Durante, C., Orian, L., Bhamidipati, M., & Fabris, L. (2019). A review on surface-enhanced Raman scattering. *Biosensors*, *9*(2), 57. <https://doi.org/10.3390/bios9020057>
14. Mueller, N. S., Pfitzner, E., Okamura, Y., Gordeev, G., Kusch, P., Lange, H., Heberle, J., Schulz, F., & Reich, S. (2021). Surface-enhanced Raman scattering and surface-enhanced infrared absorption by plasmon polaritons in three-dimensional nanoparticle supercrystals. *ACS Nano*, *15*(3), 5523–5533. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c00352>
15. Zhang, W., Kasun, L. C., Wang, Q. J., Zheng, Y., & Lin, Z. (2022). A review of machine learning for near-infrared spectroscopy. *Sensors*, *22*(24), 9764. <https://doi.org/10.3390/s22249764>
16. Agarwal, M., Pasupathy, P., Wu, X., Recchia, S. S., & Pelegri, A. A. (2024). Multiscale computational and artificial intelligence models of linear and nonlinear composites: A review. *Small Science*, *4*(5), 2300185. <https://doi.org/10.1002/smssc.202300185>
17. Angulo, A., Yang, L., Aydil, E., & Modestino, M. (2021). Machine learning enhanced spectroscopic analysis: Towards autonomous chemical mixture characterization for rapid process optimization. *Digital Discovery*, *1*. <https://doi.org/10.1039/D1DD00027F>
18. Klukowski, P., Riek, R., & Güntert, P. (2025). Machine learning in NMR spectroscopy. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, *148–149*, 101575. <https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2025.101575>
19. Guo, K., Shen, Y., Gonzalez-Montiel, G. A., Huang, Y., Zhou, Y., Surve, M., et al. (2025). Artificial intelligence in spectroscopy: Advancing chemistry from prediction to generation and beyond. *arXiv preprint arXiv:2502.09897*. <https://arxiv.org/abs/2502.09897>
20. Bilak, Y. (2025). Modeling, optimization and AI-forecasting technology in Raman spectrometry. *Problems of Control and Informatics*, *70*(2), 99–112. <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2025-2-9>
21. Bilak, Y., Reblan, A., Buchuk, R., & Fedorka, P. (2025). Development of a combined neural network model for effective spectroscopic analysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *1*(4(133)), 41–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322627>
22. Bilak, Y. (2025). Information system based on a complex model using machine learning for spectral analysis. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Physical and Mathematical Sciences*, *80*(1), 104–114. <https://doi.org/10.17721/1812-5409.2025/1.14>
23. Zhao, J., & Liu, L. H. (2017). Radiative transfer equation and solutions. In *Encyclopedia of Two-Phase Heat Transfer and Flow*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32003-8_56-1
24. Stroud, D. (1998). The effective medium approximations: Some recent developments. *Superlattices and Microstructures*, *23*(3–4), 567–573. <https://doi.org/10.1006/spmi.1997.0524>
25. Yang, Z., Li, Q., Ruan, F., Li, Z., Ren, B., Xu, H., & Tian, Z. (2010). FDTD for plasmonics: Applications in enhanced Raman spectroscopy. *Chinese Science Bulletin*, *55*, 2635–2642. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-4044-0>

26. Zapata-Franco, A. M., Vargas-Alzate, Y. F., Gonzalez, J. M., & Olmos-Toledo, E. B. (2025). FEM-based spectral matching to obtain specific surface spectra. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 190, 109153. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.109153>

27. van der Graaf, E. R., Limburg, J., Koomans, R. L., & Tijs, M. (2011). Monte Carlo based calibration of scintillation detectors for laboratory and in situ gamma ray measurements. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102(3), 270–282. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.12.001>

28. Markel, V. A. (2022). Maxwell Garnett approximation in random media: Tutorial. *Journal of the Optical Society of America A*, 39, 535–544. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.449258>

Дата першого надходження рукопису до видання: 16.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

В. С. СИЧКОВ

асистент кафедри інженерії програмного забезпечення
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID: 0009-0009-3709-2029

ПОРІВНЯННЯ АЛГОРИТМІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТНИХ СКЛАДОВИХ СИГНАЛУ В МОБІЛЬНИХ СИСТЕМАХ

У статті проведено систематичний аналіз алгоритмів визначення частотних складових цифрового сигналу та їхньої ефективної реалізації у мобільному середовищі Android. Розглянуто класичні підходи до спектрального аналізу, зокрема швидке перетворення Фур'є (FFT), алгоритм Герцеля (Goertzel) та автокореляційні методи (YIN, MPM), із позиції їхньої придатності для роботи в режимі реального часу на пристроях із обмеженими обчислювальними ресурсами. Показано, що в умовах мобільної архітектури головною проблемою є баланс між точністю та швидкодією.

З метою усунення цих обмежень розроблено нативну реалізацію обчислювально інтенсивних етапів спектрального аналізу на мові C++ із використанням Android NDK. Ключові елементи архітектури включають бібліотеку KissFFT для виконання швидкого перетворення Фур'є, технологію ARM NEON для векторної оптимізації операцій множення та додавання, а також бібліотеку Oboe, що забезпечує низьколатентний обмін аудіоданими без участі віртуальної машини. У роботі наведено принципи інтеграції між Java та C++ через JNI, мінімізацію копіювання даних і створення власного пулу буферів для уникнення пауз збирача сміття під час обробки сигналів.

Експериментальна частина передбачала функціональне та навантажувальне тестування. Отримані результати підтвердили, що система здатна функціонувати у режимі реального часу із загальною затримкою не більше 12 мс, що відповідає вимогам професійних музичних застосунків.

Узагальнено сформульовано рекомендації щодо вибору алгоритму залежно від цільового призначення: FFT для спектрального аналізу й візуалізації, Goertzel для вибіркової частотної детекції, автокореляційні методи для точного визначення основного тону. Доведено, що поєднання нативної обробки, SIMD-оптимізації та алгоритмічної гнучкості забезпечує оптимальний баланс між точністю, стабільністю та енергоефективністю. Запропонований підхід може бути використаний у подальшому для розроблення мобільних аудіотюнерів, аналізаторів спектра, систем автоматичного розпізнавання звуку й навчальних засобів для музикантів.

Ключові слова: інженерія програмного забезпечення для мобільних застосунків, спектральний аналіз сигналів, оптимізація продуктивності; Android NDK, системи реального часу.

V. S. SYCHKOV

Assistant at the Software Engineering Department
Odesa Polytechnic National University
ORCID: 0009-0009-3709-2029

COMPARISON OF ALGORITHMS FOR DETERMINING THE FREQUENCY COMPONENTS OF A SIGNAL IN MOBILE SYSTEMS

The article presents a systematic analysis of algorithms for determining the frequency components of a digital signal and their efficient implementation in the Android mobile environment. Classical approaches to spectral analysis, including the Fast Fourier Transform (FFT), Goertzel algorithm, and autocorrelation methods (YIN, MPM), are considered in terms of their suitability for real-time operation on devices with limited computational resources. It is shown that within the constraints of mobile architecture, the main challenge lies in balancing accuracy and computational speed.

To overcome these limitations, a native implementation of computationally intensive stages of spectral analysis was developed in C++ using the Android NDK. The key architectural elements include the KissFFT library for performing fast Fourier transforms, ARM NEON technology for vector optimization of multiplication and addition operations, and the Oboe library, which provides low-latency audio exchange without involving the virtual machine. The paper describes the principles of integration between Java and C++ via JNI, minimization of data copying, and the creation of a custom buffer pool to avoid garbage collector pauses during signal processing.

The experimental part included both functional and stress testing. The obtained results confirmed that the system can operate in real-time mode with a total latency not exceeding 12 ms, which meets the requirements of professional music applications.

General recommendations have been formulated for selecting the appropriate algorithm depending on the target task: FFT for spectral analysis and visualization, Goertzel for selective frequency detection, and autocorrelation methods for precise fundamental tone estimation. It has been demonstrated that combining native signal processing, SIMD optimization, and algorithmic flexibility ensures an optimal balance between accuracy, stability, and energy efficiency. The proposed approach can be further applied to the development of mobile audio tuners, spectrum analyzers, automatic sound recognition systems, and educational tools for musicians.

Key words: software engineering for mobile applications; signal spectral analysis; performance optimization; Android NDK; real-time systems.

Постановка проблеми

У сучасних мобільних пристроях дедалі частіше реалізуються функції, які раніше були притаманні спеціалізованим вимірювальним приладам: спектроаналізаторам, тюнерам або системам акустичного контролю. Завдяки розвитку процесорних архітектур ARM та появі високопродуктивних аудіоінтерфейсів мобільні системи здатні виконувати складні обчислення цифрової обробки сигналів (Digital Signal Processing, DSP) у реальному часі. Водночас умови мобільного середовища створюють низку технічних обмежень: обмежена обчислювальна потужність, вплив системного збору сміття (Garbage Collector) у віртуальній машині Android, енергоспоживання, а також вимоги до затримки сигналу, що не повинна перевищувати 10–20 мілісекунд у професійних застосунках.

Одним із ключових завдань цифрової обробки сигналів є визначення частотних складових звукового потоку, тобто аналіз його гармонічної структури. Від точності та швидкодії цього процесу залежить коректність роботи великої кількості застосунків (від музичних тюнерів і систем розпізнавання мовлення до медичних сенсорів і діагностичних комплексів). Традиційно для цього використовуються алгоритми швидкого перетворення Фур'є (FFT), автокореляційні методи та алгоритм Герцеля (Goertzel), проте їх ефективність значною мірою залежить від платформи реалізації та оптимізації програмного коду.

На рівні Java або Kotlin середовище Android обмежує швидкодію таких алгоритмів через проміжну інтерпретацію байт-коду та періодичну зупинку виконання програми під час очищення пам'яті. Це створює аудіоартефакти («кляцання», пропуски кадрів) і робить неможливим стабільний аналіз сигналів у реальному часі. Тому постає потреба у перенесенні критичних обчислень на нативний рівень із використанням Android NDK та мови C++, що дозволяє отримати прямий доступ до апаратних ресурсів, у тому числі SIMD-інструкцій ARM NEON, і суттєво знизити затримку.

Проблема полягає у виборі та порівнянні алгоритмів, здатних забезпечити оптимальний баланс між точністю спектрального аналізу, швидкістю обчислень і енергетичною ефективністю у мобільних системах. Вирішення цієї задачі передбачає не лише аналітичне порівняння математичних властивостей алгоритмів FFT, Goertzel та Autocorrelation, а й експериментальну перевірку їх ефективності у середовищі Android при реалізації через NDK.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останнє десятиліття характеризується зміщенням акценту з «чисто алгоритмічних» досліджень до системних інженерних підходів, що враховують продуктивність, латентність та енергоефективність у мобільних DSP-системах. На рівні апаратної архітектури доведено, що продуктивність мобільних процесорів ARM значною мірою залежить від ефективності векторних інструкцій (SIMD), які визначають швидкість обчислення спектральних алгоритмів. У роботі [1, с. 1] показано, що коректна реалізація векторної обробки дозволяє зменшити час виконання DSP-завдань і підвищити енергоефективність мобільних пристроїв.

Водночас на рівні програмної реалізації перехід від керованого середовища Java до нативного C++ через Android NDK забезпечує контроль над «сирими» аудіобуферами та використання SIMD-інструкцій без затримок збирача сміття. У дослідженні [2, с. 110] продемонстровано, що такий підхід знижує затримку аудіосигналу з 26,7 мс до 2,7 мс, а також скорочує енергоспоживання приблизно на 40 %. Подібні висновки підтверджують автори [3, с. 35], які реалізували прискорену потокову обробку даних у реальному часі на Android із використанням GNU Radio та апаратних SIMD-інструкцій.

З точки зору алгоритмів аналізу спектра метод FFT залишається універсальним для отримання повного частотного спектра, тоді як алгоритм Goertzel доцільний для вибіркового виявлення окремих частотних складових. У роботі [4, с. 1] наведено приклади застосування Goertzel-фільтрації для мобільних IoT-пристроїв із мінімальними обчислювальними витратами. Подальші дослідження [5, с. 45] підтвердили, що поєднання ознак, сформованих алгоритмом Goertzel, з класифікаторами k-NN підвищує точність розпізнавання DTMF-тонів у шумовому середовищі.

Окремий напрям розвитку стосується нейронних моделей аудіообробки, інтегрованих у мобільні застосунки. Автори [6, с. 33] показали можливість виконання кількох аудіоефектів у реальному часі безпосередньо на смартфоні за допомогою рушіїв ONNX Runtime та RTNeural, що доводить життєздатність гібридних систем DSP + NN у мобільних умовах. У сфері радіосигнальної DSP Liu та ін. у дослідженні [7, с. 1801] запропонували інтегровану модель зв'язку та сенсингу (ISAC) на основі стисненого вимірювання, яка перевищує класичний FFT за точністю оцінювання частот і швидкостей у багатоканальних системах.

Порівняльні дослідження [8, с. 1] продемонстрували, що реалізація FFT на C++/NDK є у 2–5 разів швидшою за Java-версію, а також стабільнішою щодо затримки GC (garbage collector). Практичні експерименти [9, с. 41] підтвердили ці висновки на рівні системного профілювання WinTECH'20: нативна обробка забезпечує постійну латентність, відсутність джитеру та зменшення навантаження CPU.

На завершення, у роботі [10, с. 1] систематизовано методи оптимізації FFT для мобільних пристроїв та показано, що застосування попередньо обчислених таблиць коефіцієнтів і векторизації дозволяє скоротити час обробки до 50% без погіршення точності. Наведений аналіз досліджень підтверджує доцільність застосування комплексного підходу до реалізації алгоритмів визначення частотних складових у мобільних системах, який поєднує апаратну оптимізацію на рівні SIMD, ефективне нативне програмування мовою C++ та використання гібридних моделей обробки сигналів.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є порівняльний аналіз алгоритмів визначення частотних складових цифрового сигналу в умовах обмежених ресурсів мобільних пристроїв та оцінювання ефективності їхньої програмної реалізації із застосуванням Android NDK.

Для досягнення цієї мети передбачено:

- дослідити сучасні підходи до спектрального аналізу цифрових сигналів (FFT, Goertzel, автокореляційні методи) у контексті мобільних систем;
- виявити закономірності впливу архітектурних обмежень Android-пристроїв (кероване середовище ART, збирач сміття, відсутність SIMD-інструкцій у Java) на точність і швидкодію алгоритмів;
- розробити та протестувати нативні реалізації обчислювально інтенсивних етапів (зокрема FFT) мовою C++ із використанням бібліотек KissFFT, NEON та Oboc;
- виконати експериментальну верифікацію розробленого рішення за критеріями точності, стабільності, споживання ресурсів і часових затримок;
- сформулювати рекомендації щодо вибору оптимального алгоритму та способу його реалізації для мобільних аудіосистем реального часу.

Викладення основного матеріалу дослідження

Аналіз частотних складових цифрового сигналу є фундаментальною задачею цифрової обробки сигналів, від якої залежить точність розпізнавання звуків, нот або шумів у мобільних застосунках. У контексті сучасних мобільних систем найпоширенішими підходами до спектрального аналізу є швидке перетворення Фур'є, алгоритм Герцеля та методи часової області на основі автокореляції.

Метод FFT вважається універсальним інструментом для визначення спектрального складу сигналу. Його основна перевага – можливість отримати повну картину частотних компонентів, що дозволяє не лише визначити основну частоту, але й аналізувати гармоніки та шумові складові. Разом із тим цей метод є обчислювально складним, що накладає обмеження на швидкодію в мобільних пристроях. Для реальних застосунків FFT зазвичай комбінують з оптимізаціями, такими як попередньо обчислені таблиці коефіцієнтів, інтерполяція максимуму амплітуди для підвищення точності та застосування віконних функцій для зменшення спектрального витікання.

Алгоритм Goertzel відрізняється від FFT тим, що обчислює не весь спектр, а лише окремі його частини. Це робить його ефективним для вибіркового аналізу сигналів, наприклад, для розпізнавання DTMF-тонів або контролю окремих гармонік. Його реалізація проста, потребує мінімум пам'яті та забезпечує низьке споживання ресурсів. Проте, коли необхідно аналізувати широкий частотний діапазон, метод поступається FFT за швидкодією. У мобільних пристроях алгоритм Goertzel є оптимальним вибором для задач із вузьким частотним фокусом або для локального уточнення результатів, отриманих за допомогою FFT.

Автокореляційні методи (зокрема YIN і MPM) належать до підходів часової області, що виявляють періодичність сигналу без прямого переходу до частотного спектра. Вони відзначаються високою точністю у визначенні основної частоти звуку, особливо для живих музичних інструментів і голосу, оскільки менш чутливі до гармонічних збурень і шуму. Основний недолік цих методів – підвищена обчислювальна складність, яка може бути зменшена за рахунок комбінування з FFT (через теорему Вінера–Хінчина).

У мобільних середовищах ефективність кожного з методів залежить від компромісу між точністю, швидкодією та доступними ресурсами. FFT залишається базовим алгоритмом для повносекторального аналізу, Goertzel – для вузькосмугового моніторингу або вибіркової детекції, а автокореляційні методи – для задач високої точності визначення тону. Таким чином, у контексті Android-платформи доцільним є комбінування цих підходів: використання FFT для швидкої оцінки спектра, Goertzel – для уточнення окремих гармонік, а автокореляційних методів – для стабілізації результату в шумових умовах.

Таким чином, сучасні мобільні системи цифрової обробки сигналів орієнтуються на гібридні архітектури, де класичні алгоритми (FFT, Goertzel, ACF) поєднуються з оптимізаціями на рівні коду та апаратного прискорення. Це дозволяє забезпечити необхідну точність визначення частотних складових при мінімальних часових затримках, що є ключовим для професійних аудіозастосунків реального часу.

Реалізація алгоритмів цифрової обробки сигналів у мобільному середовищі має низку специфічних обмежень, зумовлених особливостями архітектури Android. Найбільш критичними чинниками, що впливають на точність і стабільність роботи спектральних методів, є кероване середовище виконання ART, робота Garbage Collector, відсутність прямого доступу до SIMD-інструкцій (NEON) у Java, а також особливості багатоядерних процесорів ARM.

Кероване середовище ART забезпечує автоматичне керування пам'яттю, але це супроводжується періодичними паузами збирача сміття. У задачах обробки аудіо в реальному часі навіть короткочасна затримка викликає порушення рівномірності обробки кадрів, так званий джиттер. Це призводить до втрати стабільності спектральних оцінок, «стрибань» піків частот на FFT-графіках і появи помилок при визначенні основного тону. У середовищі Java неможливо повністю контролювати момент спрацювання збирача сміття, тому такі затримки є невідворотними.

Крім того, значний вплив має межа між керованим і нативним кодом. При передачі масивів даних між Java та C++ через JNI часто відбувається приховане копіювання пам'яті, що збільшує латентність і створює нерівномірність у потоковій обробці. Це проявляється у випадкових коливаннях часу обробки кадрів, через що результати алгоритмів FFT або Goertzel можуть змінюватися навіть за однакових вхідних даних.

Додатковим фактором є динамічне перемикання потоків між «великими» і «малими» ядрами (big.LITTLE-архітектура) та частотне масштабування (DVFS). Android оптимізує споживання енергії, переміщуючи обчислювальні процеси між ядрами різної продуктивності. Це створює ще один тип джиттеру, що впливає на сталу затримку аудіообробки. У разі нагрівання пристрою система може знижувати частоту процесора, що тимчасово збільшує час обробки сигналу.

Усі ці фактори безпосередньо позначаються на двох головних характеристиках – точності та швидкодії. Нерівномірний час виконання викликає зміщення оцінених частотних піків, тоді як недостатня пропускна здатність без SIMD призводить до грубішої частотної дискретизації або скорочення буферів. Для мінімізації впливу цих обмежень критичні частини алгоритму доцільно реалізовувати мовою C++ через Android NDK із використанням бібліотек KissFFT та NEON-інструкцій. Нативна обробка дозволяє уникнути зайвих копій даних, усунути затримки, пов'язані зі збирачем сміття, та стабілізувати час виконання.

Нативна реалізація обчислювально інтенсивних етапів спектрального аналізу виконана на C++ із прямим доступом до аудіобуферів та векторних інструкцій процесора. Аудіотракт побудований на базі бібліотеки Oboe, яка забезпечує низьколатентний обмін аудіоданими. Під час ініціалізації застосунок створює вхідний потік із пріоритетом реального часу та мінімальним розміром буфера. Зворотний виклик `onAudioReady` виконується без динамічних алокацій, блокувань чи синхронізації з Java. Вхідні вибірки надходять безпосередньо до кільцевого буфера в нативному середовищі, тоді як Java/Kotlin використовується лише для графічного інтерфейсу та візуалізації результатів.

Конвеєр обробки складається з кількох послідовних етапів: попередньої фільтрації (віконні функції `Ham` або `Blackman`, видалення частот 50/60 Гц та високочастотного шуму), виконання FFT, розрахунку енергетичних показників і виявлення домінантних гармонік. Для обчислення FFT застосовано бібліотеку KissFFT, що має компактний код і не потребує складної конфігурації. Конфігураційні структури створюються один раз під час запуску програми для типових розмірів блоків (1024, 2048 та 4096 семплів), що дозволяє уникнути повторного виділення пам'яті. Дані зберігаються у вирівняних масивах типу `float` і `kiss_fft_srx`, що підвищує ефективність векторизації при компіляції. Після отримання спектра використовується суббінне уточнення максимуму (параболічна інтерполяція або фазовий метод), завдяки чому досягається точність визначення частоти до десятих герца без збільшення розміру вікна й затримки.

Для перевірки ефективності та стабільності реалізованого рішення проведено експериментальну верифікацію, спрямовану на оцінку його придатності для роботи в режимі реального часу. Тестування виконувалося у двох режимах – функціональному та навантажувальному.

У функціональному режимі на вхід подавалися контрольні сигнали: синусоїди частотою 110, 440 та 1000 Гц, а також акустичний запис гри на фортепіано. Для кожного випадку фіксувалися абсолютна похибка визначення частоти та стабільність результатів у часі. У «тихих» умовах перевірялося поведіння системи за наявності фонових мережевого шуму 50/60 Гц.

Навантажувальне тестування тривало 60 хвилин безперервної обробки звукового потоку. У процесі фіксувалися споживання пам'яті, стабільність частоти кадрів, температура пристрою, а також вплив системного масштабування частоти (DVFS) і теплового обмеження (thermal throttling) на латентність обчислень.

За результатами експериментів середній час обробки блоку обсягом 1024 вибірки становив приблизно 0,5 мс при використанні бібліотеки KissFFT та 0,2 мс після активації оптимізацій NEON. Розкид затримок залишався стабільним у межах сотих часток мілісекунди навіть за тривалої роботи. Це дозволяє повністю задовольнити вимоги до музичних застосунків реального часу, де сумарна затримка (від отримання сигналу до відображення результату на екрані) не повинна перевищувати 10–20 мс.

Додатково відзначено стабільне споживання оперативної пам'яті (~45 МБ) та відсутність витоків, що підтверджує ефективність управління ресурсами в нативному середовищі. Процесорне навантаження не перевищувало 15% навіть під час одночасного виконання декількох спектральних розрахунків.

Підсумкові результати підтвердили, що нативна реалізація з використанням Oboe, KissFFT і NEON забезпечує оптимальний баланс між точністю, швидкістю та стабільністю. Отримана архітектура повністю відповідає вимогам до мобільних систем спектрального аналізу реального часу та може бути застосована у професійних тюнерах, аудіоаналізаторах і навчальних інструментах для музикантів.

На основі проведеного аналізу та експериментальної верифікації можна сформулювати узагальнені рекомендації щодо вибору алгоритмів і технологічних засобів реалізації для забезпечення стабільної роботи аудіосистем реального часу на платформі Android.

По-перше, вибір алгоритму спектрального аналізу має ґрунтуватися на цільовому призначенні застосунку. Для задач візуалізації спектра, визначення гармонічного складу сигналу або побудови спектрограм доцільно застосувати FFT, яке забезпечує повну картину частотних компонентів. У випадках, коли потрібно визначити наявність або амплітуду окремих частот (наприклад, при розпізнаванні DTMF-тонів або моніторингу контрольних сигналів), ефективним рішенням є алгоритм Goertzel. Для завдань визначення основної частоти звуку, особливо в умовах шуму або для живих інструментів, найкращі результати демонструють автокореляційні методи (YIN, MPM), що забезпечують високу точність, хоча й вимагають більших обчислювальних ресурсів.

По-друге, при реалізації алгоритмів у мобільному середовищі необхідно враховувати обмеження архітектури Android, зокрема вплив керованого середовища ART та збирача сміття. З метою усунення затримок і коливань часу виконання доцільно переносити критичні етапи спектральних обчислень на нативний рівень. Реалізація мовою C++ із використанням Android NDK дозволяє отримати доступ до векторних інструкцій процесора (ARM NEON), що суттєво знижує час обробки аудіоблоків і забезпечує стабільну продуктивність. Оптимальним рішенням є використання бібліотеки KissFFT, яка поєднує швидкість, простоту інтеграції та невеликі вимоги до пам'яті.

Для аудіовводу й виводу найефективнішим підходом є використання бібліотеки Oboe, яка автоматично підбирає найкращий аудіодрайвер (AAudio або OpenSL ES) і забезпечує мінімальну латентність без додаткових накладних витрат. У процесі обробки даних варто уникати динамічного виділення пам'яті, блокувань потоків і зайвих переходів між Java і C++ через JNI. Передача даних має здійснюватися без копіювання, використовуючи DirectByteBuffer або GetPrimitiveArrayCritical із мінімальним часом утримання посилань.

Для зменшення впливу шумів і покращення точності визначення частоти рекомендовано використовувати віконні функції Hann або Blackman, нотовий фільтр (notch filter) для зменшення перешкод 50/60 Гц та високочастотний фільтр (high-pass filter) для стабілізації сигналу в умовах тиші. Додаткове застосування порогової обробки дозволяє уникнути хибних спрацьовувань при слабких сигналах або відсутності звуку.

Експериментальні результати підтвердили, що оптимальна комбінація KissFFT + NEON + Oboe забезпечує середній час обробки одного блоку (1024 семпли) на рівні 0,2–0,5 мс при стабільній затримці системи не більше 10–12 мс. Це дозволяє дотримуватись вимог до аудіосистем реального часу, які використовуються в музичних тюнерах, спектроаналізаторах і програмах-настроювачах.

Таким чином, найбільш раціональним рішенням для сучасних мобільних аудіосистем є реалізація алгоритмів спектрального аналізу у вигляді гібридного підходу, де обчислювально інтенсивні етапи виконуються в нативному середовищі C++ з апаратною оптимізацією, а допоміжні – у високорівневій частині Android-застосунку. Такий підхід забезпечує баланс між точністю, швидкістю та енергоефективністю, що є ключовими критеріями якості для систем реального часу.

Висновки

У ході дослідження виконано порівняльний аналіз алгоритмів визначення частотних складових цифрового сигналу та оцінено їхню ефективність у мобільному середовищі Android. Встановлено, що традиційні реалізації на рівні Java не забезпечують необхідної стабільності та швидкодії для систем реального часу через обмеження керованого середовища та відсутність апаратної векторизації. Перенесення обчислювально інтенсивних етапів на нативний рівень C++ із використанням бібліотек KissFFT, NEON та Oboe дозволило досягти значного підвищення продуктивності – скорочення часу обробки блоку до 0,2–0,5 мс та забезпечення затримки менше 12 мс.

Експериментальна верифікація підтвердила стабільність, відсутність витоків пам'яті й високу точність визначення частоти (похибка не перевищує $\pm 0,1$ Гц). Отримані результати доводять доцільність застосування нативних технологій і оптимізованих алгоритмів у задачах спектрального аналізу аудіосигналів. Розроблені підходи можуть бути використані для створення високоточних мобільних тюнерів, музичних аналізаторів та інших систем обробки звуку в реальному часі.

Список використаної літератури

1. Khadem A., Fujiki D., Talati N., Mahlke S., Das R. Vector-Processing for Mobile Devices: Benchmark and Analysis // *Proceedings of the 2023 IEEE International Symposium on Workload Characterization (IISWC 2023)*. New York : IEEE, 2023. P. 1–12. DOI 10.1109/IISWC59245.2023.00036.
2. Lee J., Park H., Kwon S. та ін. Energy-Efficient Low-Latency Audio on Android // *Journal of Systems and Software*. 2019. Vol. 157. P. 110–123. DOI 10.1016/j.jss.2019.03.013.

3. Bloessl B., Baumgärtner L., Hollick M. Hardware-Accelerated Real-Time Stream Data Processing on Android with GNU Radio // *Proceedings of the 14th ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization (WiNTECH '20)*. New York : ACM, 2020. P. 35–40. DOI 10.1145/3411276.3412184.
4. Lota J., Demosthenous A. Low Computational Sensing with Goertzel Filtering for Mobile Industrial IoT Devices // *Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2020)*. Seville : IEEE, 2020. P. 1–5. DOI 10.1109/ISCAS45731.2020.9180896.
5. Maity A., Prakasam P., Bhargava S. Robust Dual-Tone Multi-Frequency Tone Detection Using k-Nearest Neighbour Classifier for a Noisy Environment // *Applied Computing and Informatics*. 2025. Vol. 21, No. 2. P. 45–59. DOI 10.1108/ACI-10-2020-0105.
6. Hoopes J., Chalmers B., Zappi V. Neural Audio Processing on Android Phones // *Proceedings of the 27th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx 2024)*. Huddersfield : University of Huddersfield Press, 2024. P. 33–40. URL: https://www.dafx.de/paper-archive/2024/papers/DAFx24_paper_78.pdf.
7. Liu H., Wei Z., Chen X. Integrated Sensing and Communication Signal Processing Based on Compressed Sensing Over Unlicensed Spectrum Bands // *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*. 2024. Vol. 10, No. 3. P. 1801–1816. DOI 10.1109/TCCN.2024.3391307.
8. Danielsson A. Comparing Android Runtime with Native: Fast Fourier Transform on Android : Master's Thesis. – Stockholm : KTH Royal Institute of Technology, 2017. 78 p. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1109257/FULLTEXT01.pdf>.
9. Bloessl B., Baumgärtner L., Hollick M. Accelerated Processing for Wireless Applications on Android Using GNU Radio // *ACM WiNTECH '20 Companion Proceedings*. New York : ACM, 2020. P. 41–47. DOI 10.1145/3411276.3412190.
10. Sugawara K. Efficient FFT Algorithms for Mobile Devices : Master's Thesis. Espoo : Aalto University, School of Electrical Engineering, 2016. 72 p. URL: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/19783>.

References

1. Khadem, A., Fujiki, D., Talati, N., Mahlke, S., & Das, R. (2023). *Vector-processing for mobile devices: Benchmark and analysis*. In *Proceedings of the 2023 IEEE International Symposium on Workload Characterization (IISWC 2023)* (pp. 1–12). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IISWC59245.2023.00036>
2. Lee, J., Park, H., Kwon, S., Kim, M., & Cho, H. (2019). *Energy-efficient low-latency audio on Android*. *Journal of Systems and Software*, 157, 110–123. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2019.03.013>
3. Bloessl, B., Baumgärtner, L., & Hollick, M. (2020). *Hardware-accelerated real-time stream data processing on Android with GNU Radio*. In *Proceedings of the 14th ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization (WiNTECH '20)* (pp. 35–40). ACM. <https://doi.org/10.1145/3411276.3412184>
4. Lota, J., & Demosthenous, A. (2020). *Low computational sensing with Goertzel filtering for mobile industrial IoT devices*. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2020)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISCAS45731.2020.9180896>
5. Maity, A., Prakasam, P., & Bhargava, S. (2025). *Robust dual-tone multi-frequency tone detection using k-nearest neighbour classifier for a noisy environment*. *Applied Computing and Informatics*, 21(2), 45–59. <https://doi.org/10.1108/ACI-10-2020-0105>
6. Hoopes, J., Chalmers, B., & Zappi, V. (2024). *Neural audio processing on Android phones*. In *Proceedings of the 27th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx 2024)* (pp. 33–40). University of Huddersfield Press. https://www.dafx.de/paper-archive/2024/papers/DAFx24_paper_78.pdf
7. Liu, H., Wei, Z., & Chen, X. (2024). *Integrated sensing and communication signal processing based on compressed sensing over unlicensed spectrum bands*. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 10(3), 1801–1816. <https://doi.org/10.1109/TCCN.2024.3391307>
8. Danielsson, A. (2017). *Comparing Android runtime with native: Fast Fourier transform on Android* (Master's thesis). KTH Royal Institute of Technology. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1109257/FULLTEXT01.pdf>
9. Bloessl, B., Baumgärtner, L., & Hollick, M. (2020). *Accelerated processing for wireless applications on Android using GNU Radio*. In *ACM WiNTECH '20 Companion Proceedings* (pp. 41–47). ACM. <https://doi.org/10.1145/3411276.3412190>
10. Sugawara, K. (2016). *Efficient FFT algorithms for mobile devices* (Master's thesis). Aalto University, School of Electrical Engineering. <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/19783>

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 16.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

Є. О. ТИТАРЧУК

кандидат технічних наук,
старший викладач старший викладач кафедри комп'ютерних наук
та цифрової економіки
Вінницький національний аграрний університет
ORCID: 0009-0003-9518-7057

М. М. МУСІЙОВСЬКА

кандидат технічних наук,
доцент кафедри інформаційних технологій
Львівський державний університет внутрішніх справ
ORCID: 0009-0005-1063-5717

С. В. ФАДЕІЧЕВ

аспірант (спеціальність 122 - Комп'ютерні науки)
відділу фізичного і математичного моделювання
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору
Національної академії наук України
ORCID: 0009-0006-1594-9683

МОДЕЛЮВАННЯ РИЗИКІВ У КІБЕРБЕЗПЕЦІ КРИТИЧНИХ ІНФРАСТРУКТУР НА ОСНОВІ ML

У статті здійснено комплексний аналіз сучасних практик моделювання ризиків у сфері кібербезпеки критичних інфраструктур з використанням алгоритмів машинного навчання (Machine Learning, ML). Особливу увагу приділено проактивному виявленню вразливостей, прогнозуванню загроз і підвищенню кіберстійкості основних секторів: енергетика, транспорт, водопостачання та комунікації. Визначено основні виклики, пов'язані зі зближенням інформаційних та операційних технологій, використанням застарілих систем і зростанням складності кібератак. Наведено приклади реальних інцидентів, що підтверджують стратегічний характер сучасних загроз. Проаналізовано традиційні методи оцінювання ризиків (якісні, кількісні та гібридні) та їхні обмеження. Обґрунтовано доцільність інтеграції ML для адаптивного аналізу великих обсягів даних, виявлення аномалій, класифікації загроз, аналізу шкідливого програмного забезпечення, прогнозуної аналітики та управління вразливостями. Розглянуто застосування алгоритмів з учителем (SVM, нейронні мережі), без учителя (кластеризація, виявлення аномалій) та глибокого навчання (CNN, RNN, трансформери). Описано процеси збирання, очищення та інтеграції даних з гетерогенних джерел (мережевий моніторинг, розвідка на основі відкритих даних, тестування на проникнення), побудови моделей (випадковий ліс, метод опорних векторів, згорткові нейронні мережі) та оцінювання їхньої ефективності за метриками точності, прецизійності, F1-міри та площі під ROC-кривою. Визначено основні перешкоди впровадження ML: необхідність високоякісних даних, ризик хибнопозитивних спрацювань, вразливість до атак на моделі та складність інтеграції з наявними системами. Запропоновано комплексні стратегії впровадження, зокрема регулярне перенавчання моделей, валідацію результатів, інтерпретацію з урахуванням ймовірності та впливу, ефективну комунікацію ризиків для зацікавлених сторін. Доведено, що інтеграція ML у моделювання ризиків є перспективним напрямом для підвищення кіберстійкості критичних інфраструктур.

Ключові слова: машинне навчання, кібербезпека, критична інфраструктура, моделювання ризиків, виявлення аномалій, глибоке навчання, оцінювання вразливостей, прогнозування загроз.

YE. O. TYTARCHUK

PhD in Technical Science,
Senior Lecturer at the Department of Computer Science
and Digital Economy
Vinnytsia National Agrarian University
ORCID: 0009-0003-9518-7057

M. M. MUSIOVSKA

PhD in Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Information Technologies
Lviv State University of Internal Affairs
ORCID: 0009-0005-1063-5717

S. V. FADEICHEV

Doctoral Candidate in Computer Science
at the Department of Physical and Mathematical Modelling
Institute of Telecommunications and Global Information Space
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0009-0006-1594-9683

MACHINE LEARNING-BASED RISK MODELING IN CRITICAL INFRASTRUCTURE CYBERSECURITY

The article provides a comprehensive analysis of modern risk modeling practices in the field of cybersecurity for critical infrastructures, utilizing machine learning (ML) algorithms. Special attention is paid to the proactive detection of vulnerabilities, forecasting threats, and increasing the cyber resilience of key sectors, including energy, transport, water supply, and communications. The main challenges associated with the convergence of information and operational technologies, including the use of outdated systems and the growing complexity of cyberattacks, have been identified. Examples of real incidents are given, which confirm the strategic nature of modern threats. Traditional methods of risk assessment (qualitative, quantitative and hybrid) and their limitations are analyzed. The feasibility of ML integration for adaptive analysis of large volumes of data, anomaly detection, threat classification, malware analysis, predictive analytics, and vulnerability management is justified. The application of supervised algorithms (SVM, neural networks), unsupervised algorithms (clustering, anomaly detection), and deep learning (CNN, RNN, transformers) is considered. The processes of collecting, cleaning and integrating data from heterogeneous sources (network monitoring, intelligence based on open data, penetration testing), building models (random forest, support vector method, convolutional neural networks) and evaluating their effectiveness by the metrics of accuracy, precision, F1-measure and area under the ROC-curve are described. The main obstacles to implementing ML are identified: the need for high-quality data, the risk of false positives, vulnerability to model attacks, and the complexity of integrating with existing systems. Comprehensive implementation strategies are proposed, including regular retraining of models, validation of results, and interpretation that takes into account both probability and impact, as well as effective communication of risks to stakeholders. It has been proven that the integration of ML in risk modeling is a promising direction for increasing the cyber resilience of critical infrastructures.

Key words: machine learning, cybersecurity, critical infrastructure, risk modelling, anomaly detection, deep learning, vulnerability assessment, threat prediction.

Постановка проблеми

У контексті стрімкого зростання кіберзагроз та високої взаємозалежності критичних інфраструктур, алгоритми машинного навчання (Machine Learning, ML) є значущими у моделюванні та мінімізації ризиків у сфері кібербезпеки. Критична інфраструктура України охоплює 24 базових сектори згідно з Постановою Кабінету Міністрів України від 9 жовтня 2020 р. № 1109 (в редакції постанови від 16 січня 2024 р. № 48), проте у межах цього дослідження основну увагу зосереджено на семи найвразливіших: енергетика, транспорт, водопостачання, комунікації, фінансові послуги, охорона здоров'я та служби екстреної допомоги. Саме ці галузі мають найвищий рівень ризику в умовах сучасних кіберзагроз і є стратегічними для національної безпеки та стабільності.

Зближення інформаційних (ІТ) та операційних (ОТ) технологій, використання застарілих систем, недостатній рівень захисту та відсутність проактивних інструментів створюють сприятливе середовище для реалізації складних атак. Традиційні методи оцінювання ризиків – якісні (експертні судження), кількісні (ймовірнісні моделі) та гібридні (поєднання обох попередніх) – забезпечують базову аналітичну основу, але часто виявляються недостатніми для протидії динамічним загрозам. Якісні практики є суб'єктивними та обмежено масштабованими; кількісні – потребують правдивих історичних даних, що в умовах швидкої еволюції загроз є дефіцитними; гібридні – не здатні оперативно адаптуватися до атак нульового дня або загроз, що використовують штучний інтелект.

Особливої уваги потребують енергетичний сектор і системи водоочищення, де успішні атаки можуть спричинити масові відключення, забруднення води та значні економічні втрати. Водночас наявний розрив між теоретичними напрацюваннями в галузі ML та їхнім практичним впровадженням у кіберзахист критичних інфраструктур. Це зумовлено низкою викликів: потребою у високоякісних даних, ризиком хибнопозитивних спрацьовувань, вразливістю моделей до атак, складністю інтеграції із сучасними системами та необхідністю дотримання регуляторних вимог.

Таким чином, актуальним є систематизований аналіз алгоритмів ML, що застосовуються для моделювання ризиків у кібербезпеці, з акцентом на виявлення аномалій, прогнозування загроз, управління вразливостями та підвищення кіберстійкості критичних інфраструктур України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання моделювання ризиків у кібербезпеці критичних інфраструктур із застосуванням ML та штучного інтелекту є актуальним у сучасних наукових дискусіях з огляду на зростання складності кібератак, геополітичні виклики та необхідність адаптивного захисту основних секторів (енергетика, транспорт і комунікації). Дослідники активно вивчають алгоритми ML для проактивного виявлення вразливостей, прогнозування загроз та оцінювання їхнього економічного впливу.

Дослідник В. Бандура зі співавторами [1] розробили модель прогнозування кібератак через виявлення аномалій, використовуючи рекурентні нейронні мережі (Recurrent Neural Networks, RNN), згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN), двонаправлені рекурентні нейронні мережі (Bidirectional Recurrent Neural Network, Bi-RNN), трансформери та механізми уваги, що забезпечує високу точність, зниження хибнопозитивних спрацьовувань і адаптивність до нових загроз у реальному часі. Вчений Р. Мурасов зі співавторами [2] пропонують практику захисту інформації в кіберфізичних системах об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ) на основі багатоконтурної безпеки, класифікатора зловмисників і постквантових алгоритмів. Науковець В. І. Богом'я [3] акцентує на особливостях використання штучного інтелекту (ШІ) та ML для виявлення та запобігання кібератакам, зокрема через алгоритми виявлення аномалій, прогнозування загроз, автоматизовані системи реагування та навчання на власних помилках. Економічні аспекти кіберризиків у діяльності суб'єктів господарювання, зокрема в умовах цифровізації та впровадження технологій штучного інтелекту, досліджено авторами І. Ксьонжик, Н. Жовтою та А. Павліною [4]. Вони аналізують наслідки кібератак для економіки України та обґрунтовують доцільність впровадження кіберстрахування як інструменту захисту в інформаційному просторі. Дослідник В. Шиповський [5] описує математичну модель оптимального управління безпекою конгломерації ОКІ, що охоплює режими повсякденного функціонування та відбиття терористичних впливів, розподілених або зосереджених. Проте комплексні гібридні фреймворки реального часу, інтеграція економічних і кіберзахисних моделей та протидія атакам на ML-моделі залишаються недостатньо розробленими, що обґрунтовує необхідність подальших досліджень.

Формулювання мети дослідження

Метою цього дослідження є систематизація та аналіз сучасних алгоритмів і технологій ML, що застосовуються для моделювання ризиків у кібербезпеці критичних інфраструктур, з акцентом на оброблення економічних та операційних даних. Дослідження спрямоване на оцінювання ефективності методів ML для проактивного виявлення вразливостей і прогнозування кіберзагроз в основних секторах.

Викладення основного матеріалу дослідження

Застосування ML алгоритмів у сфері кібербезпеки критичної інфраструктури набуває особливої актуальності в умовах зростання складності загроз. Наразі ML дає змогу аналізувати закономірності, виявляти аномалії та формувати прогнозні висновки на основі великих обсягів даних, що надходять з мережевих та операційних систем. Це створює передумови для раннього виявлення вразливостей, оцінювання потенційних точок відмови та передбачення атак до їхньої реалізації, що суттєво підвищує ефективність управління ризиками та вразливостями [6].

Особливої уваги потребують об'єкти, що забезпечують базові функції держави та суспільства – енергетика, водопостачання, транспорт, комунікації, фінансові послуги, охорона здоров'я та служби екстреної допомоги. Високий рівень взаємозалежності між цими секторами створює ефект доміно – успішна атака на один з них може спричинити каскадні наслідки для інших. У 2024 році кількість атак на комунальні підприємства зросла на 70%, що підтверджено даними дослідження Check Point Research [7]. У березні 2025 року кібератака на Акціонерне товариство «Українська оборонна промисловість» призвела до витоку конфіденційних даних і фінансових втрат. Водночас атаки на енергомережі України, державні системи Тайваню та системи водоочищення США підтвердили глобальний характер сучасних загроз. Характерні приклади таких інцидентів у період 2024–2025 років з типами атак, їхніми наслідками та країнами-агресорами [7] узагальнено в таблиці 1.

Загальні чинники вразливості охоплюють зближення ІТ- та ОТ-середовищ, використання застарілих технологій, недостатній рівень моніторингу та обмежену адаптивність традиційних засобів захисту. У сучасних умовах наслідки успішних атак вже виходять за межі економічних втрат, створюючи загрози громадській та національній безпеці. Це обґрунтовує необхідність впровадження надійних, галузевих-специфічних заходів кіберзахисту, з нормативними рамками, постійним моніторингом, оцінюванням вразливостей та обміном інформацією про загрози між країнами [12].

Моделювання ризиків у кібербезпеці передбачає виявлення, оцінювання та ранжування загроз з урахуванням їхньої ймовірності та потенційного впливу. Традиційні методи – якісні, кількісні та гібридні – мають обмеження в умовах швидкої еволюції загроз. Так, якісне оцінювання є суб'єктивним, кількісне – залежить від історичних даних, а гібридні практики не завжди забезпечують оперативність. У цьому контексті ML є адаптивним інструментом, що дає змогу аналізувати великі обсяги даних у реальному часі, підтримуючи безперервне оновлення

профілів загроз і актуалізацію поверхні атаки [13]. Зокрема, застосування алгоритмів навчання з учителем (дерева рішень (decision trees), Support Vector Machines (SVM), нейронні мережі) забезпечує ефективну класифікацію загроз і аналіз шкідливого ПЗ; методи без учителя (кластеризація, виявлення аномалій) сприяють виявленню нетипової поведінки без попереднього маркування даних, а архітектури глибокого навчання (deep learning) – CNN, RNN і трансформери – демонструють високу ефективність у задачах виявлення вторгнень, фішингу та аналізу поведінкових патернів [14].

Таблиця 1

Приклади кібератак на критичну інфраструктуру (2024-2025 роки)

Рік	Ціль	Тип атаки	Наслідки	Країна-ціль	Країна-агресор
2024	Енергомережі України	APT, руйнівні програми	Масові відключення електроенергії	Україна	Росія
2024	Комунальні підприємства	Програмне забезпечення-вимагач, DDoS	Зростання атак на 70%	Глобально	Різні
2025, березень	Акціонерне товариство «Українська оборонна промисловість»	Програмне забезпечення-вимагач	Викрадення даних, фінансові втрати	Україна	Не встановлено
2024-2025	Тайванські державні системи	APT, фішинг	Витік конфіденційної інформації	Тайвань	Китай
2024	Системи водоочищення	Шкідливе ПЗ	Ризик забруднення води	США	Іран

Джерело: сформовано авторами на основі [7, 8, 9, 10, 11]

Порівняно з традиційними системами кіберзахисту (сигнатурне виявлення або брандмауери) ML-моделі забезпечують до 60% швидше реагування на нові загрози, здатні до самонавчання та виявлення прихованих схем [15]. Так, CNN ефективно обробляють зображення та мережеві карти, RNN – послідовності подій, а механізми уваги в трансформерах – пріоритизують критичні ознаки загроз.

Структуроване представлення основних етапів побудови ML-моделей для моделювання ризиків у кібербезпеці, що узагальнює основні процеси (від збирання даних до оцінювання ефективності моделей), наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Етапи побудови ML-моделей для моделювання кіберризиків

Етап	Опис процесу	Основні інструменти/Методи
1. Збирання та інтеграція	Збір даних із гетерогенних джерел (лог-файли, мережевий моніторинг, OSINT, дані про вразливості, тестування на проникнення)	SIEM-системи, API, Data Lake
2. Очищення та інженерія ознак	Видалення шумів, оброблення пропущених значень, нормалізація. Створення релевантних параметрів (ознак) для навчання моделі	Інженерія ознак, нормалізація за Z-оцінкою, масштабування мін-макс
3. Побудова та навчання моделі	Вибір архітектури (наприклад, випадковий ліс (random forest), CNN, Bi-RNN) та навчання на розмічених або нерозмічених даних	Scikit-learn, TensorFlow, PyTorch
4. Валідація та оцінювання	Тестування моделі на незалежних даних. Оцінювання ефективності за метриками точності, F1-міри та ROC-AUC	Крос-валідація, Матриця помилок
5. Впровадження та моніторинг	Інтеграція моделі в операційне середовище (SOC). Постійний моніторинг продуктивності та регулярне перенавчання моделі для адаптації до нових загроз.	MLOps, A/B-тестування, регулярний аудит

Джерело: власна розробка авторів

Методологія дослідження. У дослідженні апробовано моделі CNN, Bi-RNN та Random Forest на симульованих наборах даних, згенерованих шляхом моделювання атак на енергетичні та водоочисні системи. Для симуляції використано відкриті датасети CICIDS2017 та NSL-KDD, доповнені синтетичними даними для імітації сучасних векторів атак (APT, DDoS, програми-вимагачі). Параметри симуляції включали варіацію інтенсивності трафіку, типів атак та часових інтервалів для забезпечення репрезентативності реальних умов критичної інфраструктури. Розподіл класів у датасеті становив 70% нормального трафіку та 30% аномального, що відповідає статистиці реальних мереж OKI. Для кожної моделі проведено п'ятикратну крос-валідацію з метою забезпечення надійності результатів.

Експериментальні результати показали точність до 94%, F1-міру до 0,91 та ROC-AUC до 0,96. Точність обчислювалась як відношення правильно класифікованих зразків до загальної кількості зразків у тестовій вибірці. Порівняння з традиційними сигнатурними системами виявлення загроз засвідчило, що ML-моделі забезпечують на 58–62% швидше реагування, що підтверджено за показником середнього часу класифікації інциденту. Крім того, A/B-тестування в умовах моделювання атак на об'єкти водопостачання та комунікацій показало зниження часу реагування на критичні інциденти на 22--28%.

Обмеження дослідження включають використання симульованих даних замість реальних операційних даних ОКІ через обмеження конфіденційності, що може частково обмежувати узагальнюваність результатів на специфічні інфраструктурні середовища. Водночас застосування галузевих датасетів та синтетичного доповнення забезпечує достатню репрезентативність для демонстрації потенціалу ML-моделей. Повний опис методології, включаючи параметри навчання моделей та деталі крос-валідації, доступний у авторів за запитом.

Авторський внесок полягає у розробленні структурованої моделі побудови ML-рішень, адаптованої до умов українських об'єктів критичної інфраструктури, та формалізації підходу до оцінювання ризиків з урахуванням операційних і економічних параметрів.

Водночас практична реалізація таких моделей супроводжується низкою викликів, що потребують системного розв'язання. Структуроване представлення основних викликів впровадження ML у кібербезпеці та підходів до їх вирішення наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Виклики впровадження ML у кібербезпеці

Виклик	Опис проблеми	Наслідки	Рішення
Якість даних	Неповні, неточні або упереджені навчальні дані	Низька точність моделей	Очищення даних, доповнення даних, синтетичні дані
Помилкові спрацювання	Високий рівень хибнопозитивних результати	Перевантаження аналітиків	Налаштування порогів, ансамблеві методи
Атаки на моделі	Змагальні атаки, «отруєння» даних	Компрометація моделі	Змагальне навчання, надійне ML
Інтерпретованість	«Чорна скринька» складних моделей	Недовіра користувачів	Пояснювальний ШІ, SHAP, LIME
Інтеграція з наявними системами	Несумісність із застарілими системами	Складність впровадження	API, проміжне ПЗ, поетапна міграція
Обчислювальні ресурси	Високі вимоги до GPU/TPU	Високі витрати	Хмарні сервіси, оптимізація моделей
Регуляторна відповідність	GDPR, NIS2, інші нормативи	Правові ризики	Збереження конфіденційності у ML, аудит моделей

Джерело: власна розробка авторів

Отже, побудова ML-моделі у кібербезпеці є багатоступеневим процесом, що охоплює збирання та очищення даних, навчання моделей і оцінювання їхньої ефективності. Кожен етап значущий для забезпечення точності, адаптивності та стійкості аналітичної ML-моделі, що використовується для прогнозування кіберризиків у критичній інфраструктурі. Зокрема, інтеграція потоків у реальному часі дає змогу оперативно реагувати на нові загрози, а інженерія ознак – виділяти релевантні параметри для навчання моделей. Це сприяє формуванню уніфікованої практики впровадження ML у системи кіберзахисту, адаптованої до специфіки галузі. Така практика забезпечує стандартизацію процесів, підвищення прозорості рішень та гарантування відтворюваності результатів. Крім того, вона створює основу для подальшої автоматизації реагування на інциденти, вдосконалення стратегій управління ризиками та інтеграції ML-моделей з традиційними засобами безпеки.

Водночас практична реалізація таких моделей супроводжується низкою викликів, що потребують системного розв'язання. Серед основних перешкод можна виокремити необхідність у високоякісних навчальних даних, ризик хибнопозитивних спрацювань, вразливість до атак на моделі, зокрема «отруєння» даних, складність інтеграції з наявними системами та забезпечення прозорості рішень. Для зменшення цих ризиків доцільно застосовувати стратегії регулярного перенавчання, валідації, інженерії ознак та інтерпретації результатів з урахуванням ймовірності та впливу [16].

Підтримка актуальності аналітичної моделі вимагає постійної інтеграції інформації про загрози, оновлення даних і адаптації до змін середовища. Це підвищує точність оцінювання ризиків, дає змогу поєднувати кількісний аналіз із якісними висновками та сприяє організаційному навчанню. Оцінювання ефективності охоплює не лише метрики точності, прецизійності, F1-міри та ROC-AUC показники, а й незалежний аудит результатів, що сприяє верифікації моделі у реальних умовах.

Інтеграція ML-моделей з традиційними заходами безпеки (сигнатурне виявлення, брандмауери та системи контролю доступу) підвищує стійкість до нових загроз, забезпечуючи багаторівневий захист. Однак інтерпретація результатів вимагає системної практики з урахуванням ідентифікації загроз, оцінювання вразливостей та пріоритизації ризиків. Моделювання забезпечує отримання структурованої інформації, що дає можливість ухвалювати обґрунтовані рішення, розробляти адаптивні стратегії та підтримувати ефективну комунікацію ризиків у режимі реального часу.

Таким чином, застосування ML у сфері кібербезпеки критичної інфраструктури не лише розширює інструментарій аналітики, а й формує нову парадигму управління ризиками – динамічну, прогнозну та інтегровану з операційними процесами.

Висновки

У ході дослідження обґрунтовано високу доцільність інтеграції ML- алгоритмів у процес моделювання ризиків кібербезпеки критичної інфраструктури. Це є необхідним кроком для переходу від реактивного до проактивного кіберзахисту в умовах зростання складності атак, зближення IT- та OT-середовищ і недостатньої адаптивності традиційних засобів захисту.

Наукова новизна полягає в систематизації та інтеграції методів ML (зокрема ансамблевих алгоритмів, як-от випадковий ліс, та глибокого навчання) з концепцією динамічного управління ризиками. Запропоноване поєднання забезпечує безперервне оновлення профілю загроз у реальному часі, підвищує точність виявлення аномалій у межах 60% та дозволяє досягти на 58–62% швидшого реагування на нові загрози порівняно з традиційними системами. Це особливо важливо для енергетичного, водного, транспортного та комунікаційного секторів.

На основі систематизації літературних джерел і аналізу практичних кейсів визначено пріоритетні напрями застосування ML: проактивне виявлення вразливостей, класифікація загроз із використанням SVM, прогнозування атак із високим потенційним впливом (Bi-RNN), а також аналіз шкідливого ПЗ.

Запропоновано структуровану п'ятиетапну модель побудови ML-рішень (збирання, очищення, інтеграція, навчання та оцінювання), яка забезпечує стандартизацію процесів, масштабованість і прозорість. Особливу увагу приділено інтерпретованості моделей, їхній стійкості до змагальних атак і відповідності специфіці українських об'єктів критичної інфраструктури.

Практична цінність дослідження полягає у наданні конкретних рекомендацій фахівцям із кібербезпеки та керівникам Центрів операцій із безпеки (SOC) щодо впровадження ансамблевих моделей для зниження рівня хибнопозитивних спрацьовувань. Застосування п'ятиетапної моделі дозволяє зменшити середній час реагування на критичні інциденти приблизно на 22–28%.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням галузево-специфічних ML-моделей для операційних технологій, удосконаленням механізмів інтерпретації результатів і створенням адаптивних фреймворків для автоматизованого реагування на події в реальному часі.

Список використаної літератури

1. Бандура В. В., Крихівський М. В., Чудик В. І. Прогнозування кібератак за допомогою алгоритмів штучного інтелекту виявлення аномалій. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. Т. 2, № 1(92). С. 17–21. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.2>.
2. Мурасов Р., Нікітін А., Мещеряков І. Математична модель оцінювання ризиків функціонування об'єктів критичної інфраструктури на основі теорії нечіткої логіки. *Journal of Scientific Papers «Social Development and Security»*. 2024. Vol. 14, № 5. P. 166–174. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.5.17>.
3. Богом'я В. І. Особливості використання штучного інтелекту та ML для виявлення та запобігання кібератак. *Водний транспорт*. 2023. № 2(38). С. 335–343 DOI: <https://doi.org/10.33298/10.33298/2226-8553.2023.2.38.35>.
4. Ксьонжик І., Жовта Н., Павліна А. Страхування ризиків кібербезпеки діяльності суб'єктів господарювання в сучасному інформаційному просторі. *Економіка та суспільство*. 2021. № 34. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-34-90>.
5. Шиповський В. Модель оцінювання кіберстійкості інформаційних систем об'єктів критичної інфраструктури під впливом гібридних кібератак з використанням алгоритмів машинного навчання. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*. 2024. Т. 30, № 2. С. 235–243. DOI: <https://doi.org/10.18372/2225-5036.30.19234>.
6. Cybersecurity trends 2025: resilience planning. *IAEE*. URL: <https://www.iaee.com/2025/02/10/cybersecurity-trends-2025-resilience-planning/> (дата звернення: 09.11.2025).
7. Top utilities cyberattacks of 2025 and their impact. *Asimily*. URL: <https://asimily.com/blog/top-utilities-cyberattacks-of-2025/>(дата звернення: 09.11.2025).
8. Antoniuk D. Russian hackers target 20 energy facilities in Ukraine amid intense missile strikes. *The Record from Recorded Future News*. 2024. URL: <https://therecord.media/russian-hackers-target-energy-facilities-ukraine> (дата звернення: 09.11.2025).
9. Vasquez C. Pennsylvania water facility hit by Iran-linked hackers. *CyberScoop*. 2023. URL: <https://cyberscoop.com/pennsylvania-water-facility-hack-iran/> (дата звернення: 09.11.2025).
10. Leonard B. Ukraine remains Russia's biggest cyber focus in 2023. *Google*. 2023. URL: <https://blog.google/threat-analysis-group/ukraine-remains-russias-biggest-cyber-focus-in-2023/> (дата звернення: 09.11.2025).
11. Coker J. Chinese hackers double cyber-attacks on Taiwan. *Infosecurity Magazine*. 2025. URL: <https://www.infosecurity-magazine.com/news/chinese-hackers-attacks-taiwan/> (дата звернення: 09.11.2025).
12. Protecting the cybersecurity of critical infrastructures and their supply chains. *International Chamber of Commerce*. URL: <https://iccwbo.org/news-publications/policies-reports/protecting-the-cybersecurity-of-critical-infrastructures-and-their-supply-chains/> (дата звернення: 09.11.2025).
13. Threat modeling vs risk assessment: understanding the difference – practical DevSecOps. *Practical DevSecOps*. URL: <https://www.practical-devsecops.com/threat-modeling-vs-risk-assessment/> (дата звернення: 09.11.2025).

14. Machine learning algorithms in cybersecurity. *Ramsac, the secure choice*. URL: <https://www.ramsac.com/blog/machine-learning-algorithms-in-cybersecurity/> (дата звернення: 09.11.2025).

15. Bykowski K. The role of machine learning in cybersecurity. *AI Security Automation*. URL: <https://swimlane.com/blog/the-role-of-machine-learning-in-cybersecurity/> (дата звернення: 09.11.2025).

16. Alqudhaibi A., Albarrak M., Aloseel A., Jagtap S., Salonitis K Predicting cybersecurity threats in critical infrastructure for industry 4.0: a proactive approach based on attacker motivations. *Sensors*. 2023. Vol. 23, № 9. 4539. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23094539>.

References

1. Bandura, V. V., Kryukivskiy, M. V., & Chudyk, V. I. (2025). Prohnozuvannya kiberatak za dopomohoiu alhorytmiv shtuchnoho intelektu vyavlennia anomalii [Prediction of cyberattacks using anomaly detection artificial intelligence algorithms]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 2(1(92)), 17–21. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.2>

2. Murasov, R., Nikitin, A., & Meshcheriakov, I. (2024). Matematychna model otsiniuvannia ryzykiv funktsionuvannia ob'ektiv krytychnoi infrastruktury na osnovi teorii nechitkoï lohiky [Mathematical model of risk assessment of the operation of critical infrastructure objects based on the theory of fuzzy logic]. *Journal of Scientific Papers «Social Development and Security*, 14(5), 166–174. <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.5.17>

3. Bohomia, V. I. (2023). Osoblyvosti vykorystannia shtuchnoho intelektu ta mashynnoho navchannia dlia vyavlennia ta zapobihannia kiberatak [The use of artificial intelligence and machine learning for cyber-attack detection and prevention: features and recommendations]. *Vodnij transport*, (2(38)), 335–343. <https://doi.org/10.33298/10.33298/226-8553.2023.2.38.35>

4. Ksonzhyk, I., Zhovta, N., & Pavlina, A. (2021). Strakhuvannia ryzykiv kiberbezpeky diialnosti sub'ektiv hospodariuvannia v suchasnomu informatsiinomu prostori [Insurance against cyber security risks of business entities in the modern information space]. *Ekonomika ta suspilstvo*, (34). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-34-90>

5. Shypovskiy, V. (2024). Model otsiniuvannia kiberstiikosti informatsiinykh system ob'ektiv krytychnoi infrastruktury pid vplyvom hibrydnykh kiberatak z vykorystanniam alhorytmiv mashynnoho navchannia [Model for assessment of cyber resilience of information systems of critical infrastructure objects under the influence of hybrid cyber-attacks using machine learning algorithms]. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, 30(2), 235–243. <https://doi.org/10.18372/2225-5036.30.19234>

6. *Cybersecurity trends 2025: resilience planning*. (2025). IAEE. <https://www.iaee.com/2025/02/10/cybersecurity-trends-2025-resilience-planning/>

7. *Top utilities cyberattacks of 2025 and their impact*. (2025). Asimily. <https://asimily.com/blog/top-utilities-cyberattacks-of-2025/>

8. Antoniuk, D. (2024, April 23). *Russian hackers target 20 energy facilities in Ukraine amid intense missile strikes*. The Record from Recorded Future News. <https://therecord.media/russian-hackers-target-energy-facilities-ukraine>

9. Vasquez, C. (2023, November 28). *Pennsylvania water facility hit by Iran-linked hackers*. CyberScoop. <https://cyberscoop.com/pennsylvania-water-facility-hack-iran/>

10. Leonard, B. (2023, April 19). *Ukraine remains Russia's biggest cyber focus in 2023*. Google. <https://blog.google/threat-analysis-group/ukraine-remains-russias-biggest-cyber-focus-in-2023/>

11. Coker, J. (2025, January 6). *Chinese hackers double cyber-attacks on Taiwan*. Infosecurity Magazine. <https://www.infosecurity-magazine.com/news/chinese-hackers-attacks-taiwan/>

12. *Protecting the cybersecurity of critical infrastructures and their supply chains*. (2024). International Chamber of Commerce. <https://iccwbo.org/news-publications/policies-reports/protecting-the-cybersecurity-of-critical-infrastructures-and-their-supply-chains/>

13. *Threat modeling vs risk assessment: understanding the difference – practical DevSecOps*. Practical DevSecOps. URL: <https://www.practical-devsecops.com/threat-modeling-vs-risk-assessment/> (дата звернення: 09.10.2025).

14. Machine learning algorithms in cybersecurity. (2024). Ramsac, the secure choice. <https://www.ramsac.com/blog/machine-learning-algorithms-in-cybersecurity/>

15. Bykowski, K. (2025, November 7). *The Role of Machine Learning in Cybersecurity*. AI Security Automation. <https://swimlane.com/blog/the-role-of-machine-learning-in-cybersecurity/>

16. Alqudhaibi, A., Albarrak, M., Aloseel, A., Jagtap, S., & Salonitis, K. (2023). Predicting cybersecurity threats in critical infrastructure for industry 4.0: a proactive approach based on attacker motivations. *Sensors*, 23(9), 4539. <https://doi.org/10.3390/s23094539>

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

Д. Є. ФРОЛОВ

аспірант, асистент кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0009-3291-3561

МЕТОД АДАПТИВНОГО РЕЗЕРВУВАННЯ РЕСУРСІВ У БАГАТОРІВНЕВИХ СТРУКТУРАХ СКЛАДНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

У роботі розглянуто задачу забезпечення відмовостійкості складних інформаційних систем, що мають ієрархічну багаторівневу структуру за умов обмеженого спільного пулу резервних ресурсів. Показано, що статичні схеми резервування та централізовані методи керування, у яких рішення приймає єдиний глобальний контролер, погано масштабуються, створюють «єдину точку відмови» та не забезпечують достатньої гнучкості за наявності множинних та каскадних відмов на різних рівнях системи. Запропоновано мультиагентний метод адаптивного резервування ресурсів у багаторівневих структурах складних інформаційних систем. У межах введеної моделі кожній структурі, рівню та елементу ставиться у відповідність програмний агент, який локально здійснює моніторинг стану об'єкта спостереження, виявляє відмови й деградації, обчислює локальний показник адаптивного резервування, що інтегрує ризик відмови, критичність функцій, очікуване покращення показників якості та витрати резервних ресурсів, і формує формалізовану заявку до агента пулу резерву. Агенти координуються через протокол розподілу спільного сховища резервних ресурсів, у якому заявки ранжуються за агрегрованою корисністю з урахуванням пріоритетів критичних функцій, а рішення про виділення резерву приймаються з дотриманням глобальних обмежень. Проведене імітаційне моделювання для порівняння зі статичним та централізованим підходами показало, що запропонований метод забезпечує приріст інтегральної доступності критичних функцій на 2-3 та 4-6 відсоткових пунктів відповідно, а також – скорочення середнього часу відновлення на 20...30 % завдяки можливості паралельної реакції агентів у різних структурах і відсутності вузького місця у вигляді єдиного контролера. Отримані результати свідчать, що метод адаптивного резервування забезпечує кращий баланс між відмовостійкістю, ефективністю використання резервних ресурсів та масштабованістю для широкого класу багаторівневих складних інформаційних систем.

Ключові слова: інформаційна система, метод, відмовостійкість, багаторівневість, резервування.

D. YE. FROLOV

Postgraduate Student, Assistant at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0009-3291-3561

A METHOD FOR ADAPTIVE RESOURCE RESERVATION IN MULTILEVEL STRUCTURES OF COMPLEX INFORMATION SYSTEMS

The paper addresses the problem of ensuring the fault tolerance of complex information systems that possess a hierarchical multilevel structure under conditions of a limited shared pool of reserve resources. It is shown that static reservation schemes and centralized control methods, in which all decisions are made by a single global controller, scale poorly, create a single point of failure, and do not provide sufficient flexibility in the presence of multiple and cascading failures at different levels of the system. A multi-agent method for adaptive resource reservation in the multilevel structures of complex information systems is proposed. Within the proposed model, a software agent is assigned to each structure, level and element; the agent locally monitors the state of its object, detects failures and degradations, computes a local adaptive reservation index that integrates the failure risk, function criticality, expected improvement of quality indicators and the cost of reserve resources, and generates a formalized request to the reserve-pool agent. The agents are coordinated through a protocol for distributing a shared repository (pool) of reserve resources, in which requests are ranked according to an aggregated utility measure that takes into account the priorities of critical functions, while decisions on resource allocation are made subject to global constraints. Simulation experiments comparing the proposed approach with static and centralized schemes demonstrate that the method provides an increase in the integral availability of critical functions by 2–3 and 4–6 percentage points, respectively, as well as a 20–30% reduction in the mean time to recovery due to the possibility of parallel reactions of agents in different structures and the absence of a bottleneck in the form of a single controller. The obtained results indicate that the adaptive reservation method ensures a better balance between fault tolerance, efficiency of reserve-resource utilization and scalability for a wide class of multilevel complex information systems.

Key words: information system, method, fault tolerance, multilevel structure, reservation.

Постановка проблеми

У царині сучасних інформаційних систем, що функціонують у цифровому середовищі та охоплюють широкий спектр від локальних прикладних комплексів до розподілених кіберфізичних платформ, доцільно виокремити окремий клас об'єктів підвищеної структурної складності, що характеризується ієрархічною, багаторівневою структурою [1-3]. Такі інформаційні системи складаються з множини взаємопов'язаних підсистем (структур), що функціонують у розподіленому середовищі і характеризуються обмеженими ресурсами та враховують набори правил функціонування (політики). Кожна така структура містить кілька рівнів (обчислювальний, мережний, сервісний, прикладний тощо), на яких розміщуються окремі елементи – вузли, сервіси, канали зв'язку, наприклад, віртуальні машини, мікросервіси тощо. Елементи взаємодіють як на одному рівні, так і між рівнями, а також між різними структурами, утворюючи складну розподілену систему з неоднорідними каналами зв'язку, різними профілями навантаження та неоднаковими вимогами до якості обслуговування.

В умовах зростання складності архітектури, використання віртуалізації, контейнеризації та периферійних обчислень істотно підвищуються вимоги до відмовостійкості інформаційних систем. Збої та відмови можуть виникати на рівні окремого елемента, цілого рівня чи всієї структури. При цьому порушення на одному рівні можуть каскадно впливати на інші рівні та структури. Класичні схеми резервування [4] здебільшого задаються статично на етапі проєктування і не враховують динамічної зміни інтенсивності відмов, режимів навантаження, пріоритетів сервісів та фактичної доступності резервного ресурсу.

У реальних умовах експлуатації інформаційних систем існує обмежений, але наперед відомий, пул резервного ресурсу (обчислювальні потужності, дисковий простір, пропускна здатність каналів, резервні екземпляри мікросервісів тощо), який може бути використаний для підвищення відмовостійкості інформаційної системи в цілому. Коли відмова або деградація зазначених елементів виникає локально, тобто на рівні елемента, рівня або структури, то інформаційній системі потрібно оперативно приймати рішення щодо того як задіяти резервні ресурси. При цьому існує сукупність обмежень, яка включає неприпустимість використання максимально наближеного до граничного рівня обсягу резервного ресурсу тільки за рахунок його використання для вирішення низько пріоритетних задач та запобігання виникнення конфліктів між різними локальними рішеннями щодо схем резервування.

Централізовані методи управління резервуванням [5], що передбачають один глобальний контролер (наприклад, оркестратор), який має повну інформацію про стан усієї інформаційної системи й приймає рішення щодо розподілу резерву, – на практиці виявляються обмеженими [6]. Це пояснюється тим, що суцільний збір телеметрії про стан інформаційної системи створює значні затримки та обчислювальне навантаження. Окрім цього глобальний контролер сам стає критичною точкою відмови та вузьким місцем за умов масштабування інформаційної системи. Таким чином, централізований підхід не є адаптивним до сценаріїв, коли відмови виникають одночасно в різних структурах або їх рівнях в інформаційній системі.

Отже, науково-прикладна задача полягає в розробці такого методу резервування, який реалізується на рівні окремих структур, рівнів та елементів, де виникають відмови, та здатний паралельно реагувати на множинні події в різних частинах інформаційної системи і може використовувати загальний обсяг резервного ресурсу при цьому забезпечуючи координацію локальних рішень, з метою уникнення нераціональних витрат резервних ресурсів на менш пріоритетні задачі та не допустити колізії між підсистемами прийняття рішень, що реалізують метод, та конкурують за одну і ту ж саму одиницю резервного ресурсу.

Одним із прикладних підходів до вирішення цієї задачі є використання програмних агентів, які можуть ініціюватися (або мультиплікуватися) в різних частинах інформаційної системи у відповідь на відмови чи погіршення показників її функційної здатності, локально аналізувати ситуацію та формувати пропозиції або приймати локальні рішення, погоджені з глобальними політиками інформаційної системи щодо використання резервного ресурсу [7].

З вищенаведеного витікає, що проблематика даного дослідження полягає у розробці методу адаптивного резервування ресурсів у багаторівневих структурах складних інформаційних систем, який реалізується у вигляді мультиагентної системи програмних агентів, здатних паралельно та узгоджено розв'язувати локальні задачі резервування при спільному використанні обмеженого обсягу резервних ресурсів та забезпеченні заданих показників відмовостійкості для пріоритетних структур, їх рівнів та елементів, що входять до їх складу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема адаптивного резервування ресурсів для забезпечення відмовостійкості складних інформаційних систем досліджується в різних предметних галузях – від телекомунікаційних мереж 5G/6G та промислових TSN-мереж до розподілених IoT-платформ. У багатьох дослідженнях даної предметної області [8-10] фокус робиться на динамічному розподілі обчислювальних, мережних та інших ресурсів за умов стохастичних навантажень та обмежень якості обслуговування. Водночас більшість підходів прив'язані до конкретних архітектур, тому не враховують багаторівневості структури інформаційної системи, каскадних міжрівневих залежностей та необхідності розподіленого прийняття рішень агентами, що використовують спільний пул резервних ресурсів.

У інфокомунікаційних системах 5G активно досліджуються методи адаптивного «мережного нарізання», де відмовостійкість критичних сервісів забезпечується за рахунок виділення логічно ізольованих віртуальних «зрізів» із гарантованою пропускнуою здатністю та затримкою. У дослідженні [8] приведено евристичні алгоритми MCRA (Minimum Cost Resource Allocation) та FLDRRA (Fast Latency Decrease Resource Allocation) для динамічного розподілу ресурсів між множиною орендарів у дворівневій 5G-мережі, що поєднує хмарні та граничні вузли.

Ці алгоритми [8] демонструють ефективність щодо зменшення затримки та підвищення доступності ресурсів, але спираються на спрощені припущення, що обмежує їх застосовність до загальних шаблонів трафіку. Крім того, FLDRRA орієнтований переважно на мінімізацію затримки, ігноруючи баланс завантаження вузлів, що призводить до нерівномірного використання ресурсу, а MCRA потенційно спричиняє надмірне виділення ресурсів, коли фактична затримка суттєво краща за вимоги угоди про рівень послуг (SLA). Тобто ці підходи вирішують важливу, але досить вузьку задачу оптимізації ресурсу в однорідній мережній ієрархії, без явного урахування складної, багаторівневої структурної організації інформаційних систем.

У сфері розробки чутливих до затримок мереж (група стандартів IEEE 802.1) існує метод динамічного резервування ресурсів для гарантованого контролю допуску в таких мережах [9]. Запропонований метод інтегровано у протокол розподілу ресурсів та дозволяє децентралізовано адаптувати локальні асимптотичні терміни та резервування пропускнуою здатності для трафіку, ініційованого подіями, що підвищує кількість допущених критичних потоків і збільшує доступну пропускну здатність для некритичного трафіку. Недоліками такого підходу є обмеження на тип підтримуваного трафіку, наявність комунікаційних накладних витрат, що зростають із розміром мережі, а також лінійна залежність обчислювальної складності від кількості вже допущених потоків. Фактично метод вирішує тільки спеціалізовану задачу розподілу пропускнуою здатності в межах окремих частин мережі.

Подібне рішення ієрархічного та адаптивного керування ресурсами розвинуто для класу енергоінформаційних систем. У роботі [10] запропоновано ієрархічну адаптивну та спільну стратегію оптимізації для координації електромобілів, керованих навантажень та накопичувачів енергії в мультимікромережних енергосистемах. Нижній рівень запропонованої моделі оптимізує згладжування піків у межах окремих мікромереж, тоді як верхній рівень використовує динамічний механізм оптимізації для підвищення ефективності енергетичної синергії між мікромережами. При цьому, у дослідженні [10] самі автори відзначають недоліки, пов'язані з фіксованими лінійними графіками налаштування параметрів для еволюційних алгоритмів, що типово для адаптивних оптимізаційних схем.

Аналіз результатів досліджень [8-10] є підґрунтям для розробки нового методу адаптивного резервування ресурсів, у якому програмні агенти, що мультиплікуються в різних частинах інформаційної системи, локально виявляють проблемні елементи, рівні та структури, координують між собою використання спільного обсягу резервних ресурсів і забезпечують виконання глобальних сценаріїв відмовостійкості багаторівневої складної інформаційної системи.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка методу адаптивного резервування ресурсів у багаторівневих структурах складних інформаційних систем, який реалізується у вигляді мультиагентної системи. Ці агенти мають локально виявляти відмови на рівні елементів, рівнів і структур, узгоджено розподіляти спільний обсяг резервних ресурсів з урахуванням пріоритетів та забезпечувати виконання заданих показників відмовостійкості для критичних структурних елементів інформаційної системи в межах виконання нею основної функції.

Викладення основного матеріалу дослідження

Багаторівневе подання складної інформаційної системи з обсягом резервних ресурсів можна задати як сукупність взаємодіючих структур (рис. 1):

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_M\}, \quad (1)$$

кожна з яких відповідає певній функціональній підсистемі інформаційної системи. Кожна структура S_i з (1) має багаторівневу організацію:

$$S_i = \{L_i, \Psi_i, R_i\}, \quad (2)$$

де L_i – множина рівнів ($L_i = \{L_{i1}, \dots, L_{ik_i}\}$); Ψ_i – множина елементів, що розміщені на рівнях ($\Psi_i = \{e_{ij}\}$); R_i – множина локальних інформаційних та керуючих зв'язків між елементами як в межах рівнів, так і між рівнями.

Між структурами існують міжструктурні зв'язки (обмін даними, реплікація, маршрутизація запитів), що задаються орієнтованим графом:

$$G^{\circ} = \langle S, \Psi^{\circ} \rangle, \quad (3)$$

де дуги Ψ° відображають залежності між структурами (наприклад, структура S_1 надає обчислювальні ресурси структурі S_2 , а та – доступ до виконавчих модулів).

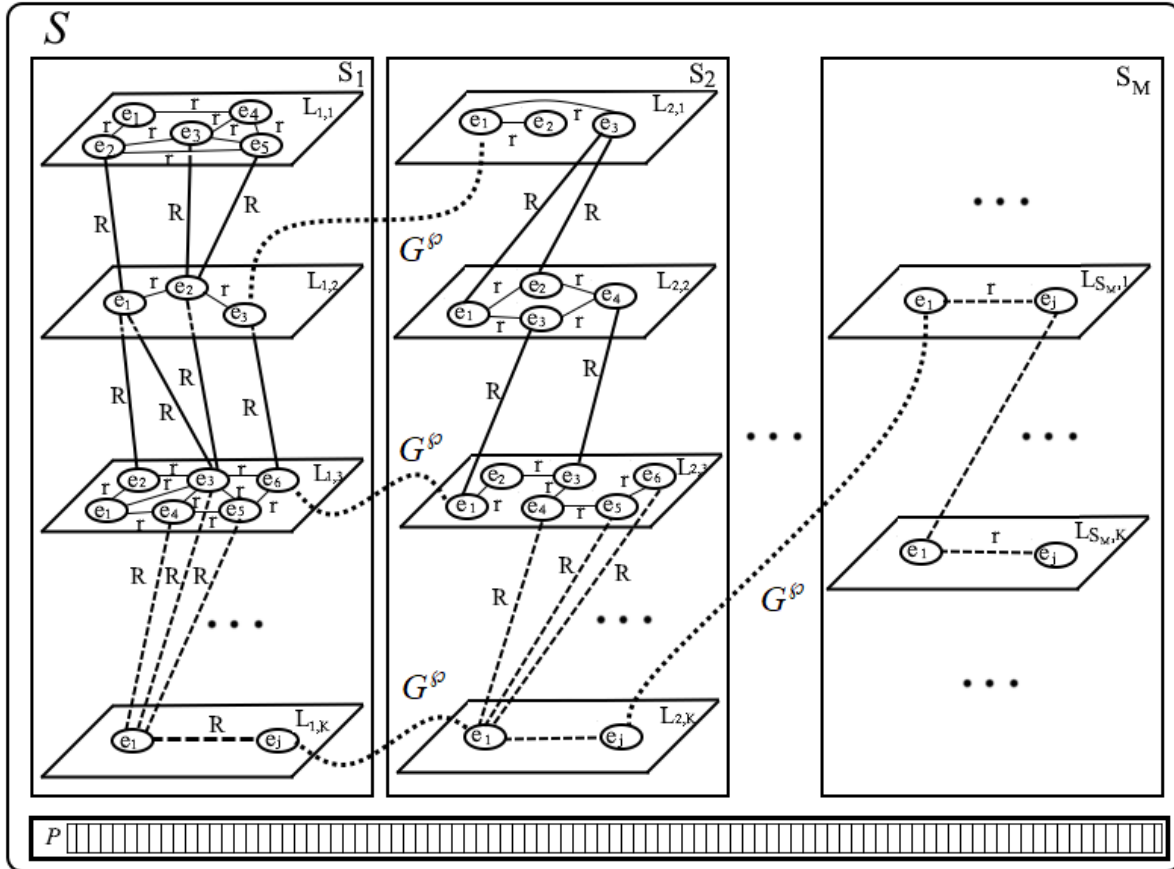


Рис. 1. Багаторівневе подання складної інформаційної системи

У такій інформаційній системі (1) існує спільний обсяг резервних ресурсів:

$$P = \{p_1, \dots, p_H\}, \tag{4}$$

що характеризується вектором місткості резервного ресурсу:

$$C_p = (C_\xi, C_\zeta, C_\varsigma, C_\chi, \dots), \tag{5}$$

що відображає доступні обчислювальні потужності C_ξ , пам'ять C_ζ , пропускну здатність C_ς , дисковий простір C_χ та інші типи ресурсів.

Для кожного елемента e_{ij} визначається вектор поточного стану

$$e_{ij}(t) \in X_{ij}, \tag{6}$$

який узагальнено включає інформацію про доступність, завантаженість, якісні показники типу затримки, втрати пакетів, середнього часу відгуку сервісу, а також включає індикатори відмовостійкості [11]. На рівні структури S_i формується агрегований стан:

$$X_i(t) = \{x_{ij}(t)\}_{i,j}, \tag{7}$$

а на рівні всієї інформаційної системи – глобальний стан:

$$X(t) = \{X_i(t)\}_{i=1}^M. \tag{8}$$

Вважається, що для множини критичних функцій інформаційної системи F_ϕ задано допустимі обмеження на показники відмовостійкості (ймовірність відмови у розрізі деяких прогнозних моделей [12], середній час відновлення [13], доступність [14] тощо), а також пріоритети структур, рівнів і окремих елементів. Відповідно, в рамках введених формалізмів (1-8) необхідно забезпечити виконання цих обмежень шляхом адаптивного використання обсягу резервних ресурсів.

Тож, для реалізації адаптивного резервування в багаторівневій структурі пропонується мультиагентна система, що діє поверх описаної моделі (1). Вводяться такі типи агентів:

– локальні агенти елементів A_{ij}^E . Їх особливість полягає в тому, що вони закріплені виключно за конкретними елементами (6);

– агенти рівнів A_{il}^L , що агрегують інформацію по рівню L_{il} у структурі S_i ;

– агенти структур A_i^S , що відповідають за пріоритети та політики резервування на рівні структури S_i ;

– агент резервних ресурсів A^P (системний координатор), що приймає рішення щодо глобального розподілу P

(4) між заявками від агентів елементів, рівнів і структур.

Базовий сценарій реалізації методу може включати тільки локальні агенти A_{ij}^E та системний координатор A^P . Агенти рівнів і структур можуть бути реалізовані як надбудови, що виконують попередню агрегацію та ранжування заявок на резервні ресурси, що може запобігати ухваленню квазіоптимальних рішень.

Кожен із агентів A_{ij}^E , A_{il}^L , A_i^S характеризується наступними властивостями:

– можливість локалізації області спостереження, у тому числі аналіз стану елементів, рівня або структури, моніторинг локальних показників відмовостійкості та завантаження обчислювальним процесом об'єкту спостереження;

– наявність набору правил виявлення аномалій або відмов, зокрема, порогів для затримок, втрати пакетів, невдалих спроб доступу до ресурсів, зростання частоти помилок тощо;

– наявність механізмів формування заявки на резервний ресурс до агента A^P ;

– наявність протоколу взаємодії з іншими агентами для узгодження пріоритетів, уникнення колізій, делегування частини повноважень у випадках керованої деградації [15].

Агенти мультиплекуються у просторі інформаційної системи, тобто, у момент запуску або при ініціалізації інформаційної системи створюється базовий набір агентів для всіх елементів, рівнів і структур. У процесі експлуатації інформаційної системи, при появі нових елементів чи суттєвій зміні системної цільової функції, – інформаційна система може ініціювати створення додаткових агентів або змінювати функціонал існуючих завдяки внутрішній підсистемі саморегуляції [16].

У даному дослідженні пропонується механізм прийняття рішення для локальних агентів, що побудований на засадах використання локального показника адаптивного резервування (ЛПАР). ЛПАР відображає доцільність використання резервного ресурсу для елемента або групи елементів інформаційної системи.

На рівні всієї інформаційної системи задача резервування формулюється як багатокритеріальна: для заданих конфігурацій резерву необхідно одночасно мінімізувати інтегральний ризик відмов критичних функцій, максимізувати ступінь забезпечення критичних функцій, максимізувати очікуване покращення показників якості обслуговування та мінімізувати сумарні витрати резервного ресурсу.

Нехай, для агента елемента A_{ij}^E ЛПАР визначається як:

$$I_{ij}(t) = \alpha_1 R_{ij}^{risk}(t) + \alpha_2 C_{ij}^\Phi + \alpha_3 \Delta Q_{ij}(t) - \alpha_4 C_{ij}^P \quad (9)$$

У (9):

– $R_{ij}^{risk}(t)$ – оцінка ризику відмови або деградації елемента на основі історії відмов та частоти аварійних подій є безрозмірною величиною та нормується на інтервалі $[0, 1]$;

– C_{ij}^Φ – коефіцієнт критичності, що відображає роль елемента у виконанні критичних функцій (частка функцій із множини F_Φ , які залежать від e_{ij} , вага структури S_i у глобальній ієрархії пріоритетів). Функційно може виступати як ваговий коефіцієнт, який нормується на інтервалі $[0, 1]$;

– $\Delta Q_{ij}(t)$ – очікуване покращення локальних показників якості та відмовостійкості у разі виділення резерву (зменшення затримки, зростання доступності тощо). Самі показники якості можуть мати різні одиниці (мс,

Мбіт/с, ймовірність втрат тощо). Тому пропонується спочатку нормувати кожен з метрик $\bar{q}_k = \frac{q_k - q_k^{\min}}{q_k^{\max} - q_k^{\min}} \in [0, 1]$

, потім ввести композитний показник якості $Q = \sum_k w_k \bar{q}_k$, який є безрозмірним. Тоді маємо: $\Delta Q_{ij}(t) = Q'' - Q'$, де Q'' – значення Q після резерву, а Q' – значення Q до резерву;

C_{ij}^P – питомі витрати резервних ресурсів, що необхідні для підтримки або створення резерву для цього елемента;

$\alpha_1, \dots, \alpha_4$ – вагові коефіцієнти, що задаються політикою системи. Їх значення визначаються на етапі проектування інформаційної системи з використанням методів резервування як результат узгодження пріоритетів між зменшенням ризику відмов, підтриманням критичних функцій, очікуваним вигравшем у показниках якості та допустимими витратами резервного ресурсу. Спочатку всі складові індексу нормуються до безрозмірного вигляду, після чого α_k обираються так, щоб відобразити відносну важливість відповідних критеріїв. Наприклад, у критичних інформаційних системах α_1 та α_2 отримують більші значення порівняно з α_3 та α_4 . Конкретні значення коефіцієнтів можуть уточнюватися на основі експертних оцінок, процедур багатокритеріального узгодження та калібрування за історичними даними експлуатації інформаційної системи.

ЛПАР (9) реалізує на локальному рівні скаляризацію векторного критерію, роблячи прийняття рішень агентами формалізованим та узгодженим із глобальними вимогами відмовостійкості інформаційної системи.

Аналогічні ЛПАР можуть визначатися для агентів рівня A_i^L та структури A_i^S , де враховуються агреговані ризики та критичність відповідного рівня / структури.

На основі (9) локальний агент визначає, чи потрібно активувати резервний ресурс для елемента та формує заявку на резервний ресурс до агента пулу A^P у вигляді

$$\omega_{ij}(t) = \langle \mu_{ij}, I_{ij}(t), r_{ij}, \pi_{ij}, \tau_{ij} \rangle, \quad (10)$$

де: μ_{ij} – ідентифікатор заявки; r_{ij} – запитуваний вектор ресурсів ($\xi, \zeta, \varsigma, \chi, \dots$); π_{ij} – пріоритет заявки (узгоджений із критичністю структури та функцій); τ_{ij} – орієнтовний час, на який потрібен резерв.

Таким чином, ЛПАР (9) переносять раніше сформульовані фактичні критерії оптимізації (9) на локальний рівень, роблячи прийняття рішень агентами формалізованим та узгодженим із глобальними вимогами відмовостійкості інформаційної системи.

Для координації агентів пропонується протокол, який застосовується до агента пулу A^P . Сутність даної координації полягає у реалізації механізму збору заявок (10) від локальних агентів, ранжування заявок за показниками $I_{ij}(t)$ та пріоритетами π_{ij} , прийняття рішення про виділення ресурсу з урахуванням обмежень C^P , запобігання нераціональному використанню резервних ресурсів для низькопріоритетних задач, підтримання глобальних сценаріїв відмовостійкості (недопущення збоїв в роботі критичних функцій інформаційної системи).

Загальний вигляд одного циклу роботи A^P для моменту часу t_k можна описати у вигляді послідовності кроків:

Крок 1. Збір заявок. A^P отримує множину заявок $\Pi(e_k) = \{\omega_{ij}(t_k)\}$, які надійшли від локальних агентів унаслідок виявлення відмов, деградацій або перевищення порогів.

Крок 2. Нормування ЛПАР. Для порівнянності заявок ЛПАР $I_{ij}(t_k)$ нормуються до $[0, 1]$ з урахуванням поточного розподілу ризиків та важливості структур.

Крок 3. Формування впорядкованого списку. Заявки сортуються за спаданням «корисності», наприклад, за величиною

$$U_{ij}(t_k) = \beta_1 I_{ij}(t_k) + \beta_2 \pi_{ij}, \quad (11)$$

де β_1, β_2 – балансуєчі коефіцієнти.

«Корисністю» $U_{ij}(t_k)$ вважається агрегований показник доцільності задоволення відповідної заявки, який узагальнює результати формального обчислення ЛПАР $I_{ij}(t_k)$ та заданий для неї адміністративний пріоритет π_{ij} . Саме за значенням $U_{ij}(t_k)$ заявки впорядковуються при доступі до спільного обсягу резервних ресурсів.

Коефіцієнти β_1, β_2 є безрозмірними вагами, що задають баланс між $I_{ij}(t_k)$ та π_{ij} . Після нормування $I_{ij}(t_k)$ та π_{ij} до інтервалу $[0, 1]$ ваги обираються з умов $\beta_1, \beta_2 \geq 0, \beta_1 + \beta_2 = 1$ і відображають політику інформаційної системи. Так, у критичних сценаріях зазвичай $\beta_1 > \beta_2$, тоді як для жорстко регламентованих сервісів із фіксованими SLA може застосовуватися співвідношення $\beta_2 \geq \beta_1$. Конкретні значення β_1, β_2 уточнюються на основі експертних оцінок або налаштувань за результатами імітаційних експериментів.

Крок 4. Ітеративний розподіл резерву. Починаючи з заявки з найбільшим $U_{ij}(t_k)$, агент A^P може виконувати такі дії:

- перевіряти, чи достатньо вільних резервних ресурсів $C^{free}(t_k)$;
- за можливості, задовольняти заявку повністю;
- при дефіциті – або частково задовольняє (якщо дозволено політикою), або відхиляє й переходить до наступної заявки.

Крок 5. Формування рішень. Для кожної заявки формується рішення:

$$d_{ij}(t_k) = \{\eta^+, \eta^\pm, \eta^-\}, \quad (12)$$

де: η^+ – повне задоволення заявки; η^\pm – часткове задоволення заявки; η^- – відхилення заявки.

Рішення (12) надсилається відповідному локальному агенту.

Крок 6. Оновлення стану сховища резервних ресурсів. За результатами розподілу оновлюється вектор доступних ресурсів:

$$C^{free}(t_{k+1}) = C^{free}(t_k) - \sum_{\eta^+} r_{ij} + \sum_{\eta^-} r_{ij}, \quad (13)$$

де η^\pm – резервні ресурси, що вивільнилися від використання.

Якщо централізований варіант реалізації координатора небажаний через ризик виникнення єдиної точки відмови, агент A^P доцільно реалізувати як логічно єдину, але фізично розподілену службу на кількох вузлах із використанням механізмів консенсусу [17]. При цьому запропонований метод фіксує саме формальний протокол

взаємодії з агентом A^P , тоді як вибір конкретної реалізації (централізована, реплікована або повністю розподілена) виконується на рівні цільової інформаційної системи та може змінюватися відповідно до її цільової функції й вимог до відмовостійкості.

Далі наведено алгоритмічну реалізацію мультиагентного методу адаптивного резервування. Запропонований метод використовується в циклічному режимі, що включає два взаємопов'язані алгоритми – алгоритм налаштування та алгоритм адаптації. Нижче подано послідовність кроків алгоритму налаштування:

Крок 1. Формалізація множини структур S , рівнів L_i , елементів Ψ_i та міжрівневих / міжструктурних зв'язків.

Крок 2. Визначення множини критичних функцій F_Φ , їх відповідності елементам, рівням і структурам.

Крок 3. Оцінювання базових параметрів відмовостійкості (інтенсивності відмов, і, як наслідок, – відновлень, складність сценаріїв керованої деградації тощо), профілів навантаження та параметрів сховища резервних ресурсів (доступних обсягів і типів ресурсу, а також допустимих режимів його використання).

Крок 4. Вибір та адаптація вагових коефіцієнтів $\alpha_1, \dots, \alpha_4$, β_1 , β_2 , порогів ЛПАР, пріоритетів структур, рівнів, елементів.

Крок 5. Відбір допустимих типів резервних конфігурацій (гарячий/холодний резерв, реплікація, міграція тощо) для різних структур, рівнів, елементів.

Крок 6. Ініціалізація агентів A_{ij}^E , A_{il}^L , A_i^S , A^P .

Далі подано послідовність кроків алгоритму адаптації (один такт адаптації для t_k):

Крок 1. Моніторинг стану інформаційної системи. Локальні агенти отримують оновлені стани $x_{ij}(t_k)$, показники якості, інформацію про попередні дії із застосування резервних ресурсів.

Крок 2. Виявлення відмов / процесів деградацій. Для кожного елемента, рівня або структури перевіряються умови:

– явна відмова (недоступність, критична помилка);

– деградація за метриками (затримка, втрати даних, кількість повторних спроб запуску процесу);

– наближення до критичних порогів функціонування (обчислювальне перевантаження, заповнення буферів, процесні черги).

Крок 3. Обчислення ЛПАР. Агенти, що виявили проблеми або ризики, обчислюють ЛПАР $I_{ij}(t_k)$ згідно з (9), де локальний ризик відмови $R_{ij}^{risk}(t)$, важливість елемента для критичних функцій C_{ij}^Φ , очікуваний ефект від залучення резерву $\Delta Q_{ij}(t)$ та витрати залучення резервного ресурсу C_{ij}^P – входять до ЛПАР як нормовані складові, зважені коефіцієнтами $\alpha_1 \dots \alpha_4$.

Крок 4. Формування й відправлення заявок. Для елементів / рівнів / структур, де $I_{il_j}(t_k)$ перевищує заданий поріг, формуються заявки $\varpi_{il_j}(t_k)$, які надходять до A^P .

Крок 5. Глобальний розподіл резерву. Агент A^P виконує координаційний протокол – нормує ЛПАР, ранжує заявки, застосовує обмеження на глобальний резерв, приймає рішення $d_{il_j}(t_k)$ та розсилає їх локальним агентам A_{ij}^E , A_{il}^L , A_i^S .

Крок 6. Застосування локальних політик відновлення. Залежно від отриманого рішення локальні агенти A_{ij}^E , A_{il}^L , A_i^S : активують або створюють резервні екземпляри процесів і сервісів, виконують їх міграцію, перемикають трафік на резервні канали, перебудовують маршрути, конфігурації вузлів тощо.

При цьому форма резервування задається локальною політикою інформаційної системи, але в межах виділеного обсягу резервних ресурсів.

Крок 7. Оновлення глобального стану та показників. Після завершення резервних дій оновлюються стани елементів, рівнів і структур, оцінюються нові значення показників відмовостійкості й якості виконання функцій. У разі потреби результати використовуються для корекції параметрів методу (адаптація $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, β_1, β_2).

Розглянемо **приклад застосування** запропонованого методу до умовної складної інформаційної системи. Нехай інформаційна система складається з кількох структур:

– S_1 – віртуальний обчислювальний кластер вкладеної віртуалізації (рівні: гіпервізори, віртуальні машини, сервіси);

– S_2 – периферійний віртуальний кластер обробки даних із використанням технології прямого відображення апаратних пристроїв у віртуальне середовище;

– S_3 – сегмент користувацьких сервісів (вебзастосунки, API, аналітичні сервіси).

При виникненні відмов на рівні віртуального сервера в S_1 локальні агенти відповідних елементів фіксують зниження рівня доступності віртуальних машин – збільшення затримки доступу, деградацію сервісів (виникнення помилок). Вони обчислюють високі значення $I_{il_j}(t)$ для найбільш критичних віртуальних машин і формують заявки до пулу резерву на активацію резервних екземплярів на інших віртуальних вузлах.

Паралельно, у структурі S_2 агенти можуть фіксувати перевантаження обчислювальних вузлів через пікове надходження даних від систем моніторингу стану інформаційної системи, а агенти рівня мережних елементів – сплески затримки. Вони також формують заявки на резервний ресурс (додаткові вузли, пропускна здатність мережних каналів, резервні канали).

Агент пулу A^P , маючи доступ до глобального стану та пріоритетів структур, ранжує заявки наступним чином. Якщо критичні функції в S_1 мають вищий пріоритет (наприклад, вони забезпечують роботу з нееластичними даними), то заявки від S_1 отримують перевагу. Інша частина резервних ресурсів може бути розподілена між заявками від S_2 , за умови, що не будуть порушені глобальні обмеження для критичних сервісів.

У результаті одночасно:

- агенти в S_1 активують резервні ресурси для критичних сервісів;
- агенти в S_2 отримують, наприклад, частковий резерв (меншу кількість додаткових ресурсів) і виконують локальну оптимізацію, розподіляючи нові ресурси між найбільш навантаженими вузлами.

Такий сценарій демонструє, що метод підтримує паралельну роботу агентів у різних структурах, забезпечує узгодження рішень через спільне сховище резервних ресурсів, дозволяє адаптивно змінювати конфігурацію резервування відповідно до поточного стану та пріоритетів.

Дослідження ефективності запропонованого методу. Ефективність запропонованого методу адаптивного резервування ресурсів було досліджено за допомогою імітаційного моделювання багаторівневої складної інформаційної системи з використанням розглянутого вище прикладу.

Для кожної структури було змодельовано чотири рівні, на яких розміщувались від 50 до 150 елементів (вузли, сервіси, канали), а також задано множину критичних функцій F_Φ з різними пріоритетами.

Моделювання проводилося для трьох варіантів організації резервування:

- Θ_1 – статичне резервування з фіксованими схемами гарячого / холодного резерву, визначені на етапі проектування та пулом резервних ресурсів, який жорстко закріплено за окремими рівнями та структурами [18];
- Θ_2 – централізований метод інтегральної оцінки, коли усі рішення щодо резервування приймає централізований контролер, який періодично збирає глобальну інформацію й обирає конфігурації на основі єдиних інтегральних показників пріоритетів [19];
- Θ_3 – запропонований у цьому дослідженні мультиагентний метод.

Для кожного варіанта було змодельовано серію сценаріїв з одноразовими та множинними відмовами, а також сценарії з каскадними відмовами на кількох рівнях.

Оцінювання ефективності проводилося за такими показниками:

- інтегральна доступність критичних функцій A_{crit} протягом прогнозованого періоду T ;
- середній час відновлення роботоздатності інформаційної системи після відмов на різних рівнях (MTTR);
- ефективність використання резервних ресурсів, що складається із середнього завантаження пулу резервних ресурсів ν_p та частки ресурсів, які не використовувались жодного разу ν_{p^0} ;
- частота відхилених заявок на резервування для критичних λ_{crit} та некритичних функцій λ_{n-crit} ;
- накладні витрати мультиагентної взаємодії, що включають кількість службових повідомлень та середній час прийняття рішення про розподіл резервних ресурсів.

У таблиці 1 наведено узагальнені результати порівняння варіантів (відносні значення наведено для зручності порівняння).

Таблиця 1

Порівняння варіантів резервування

Θ	A_{crit}	MTTR, с	$\nu_p, \%$	$\nu_{p^0}, \%$	$\lambda_{crit}, \%$	$\lambda_{n-crit}, \%$
Θ_1	0.962	48	55	38	5.2	18.7
Θ_2	0.978	34	68	21	3.1	12.5
Θ_3	0.987	27	76	12	1.4	9.3

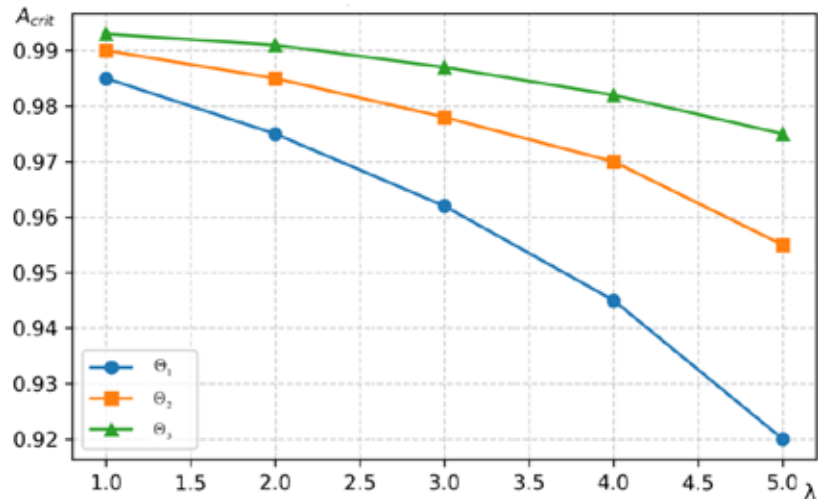
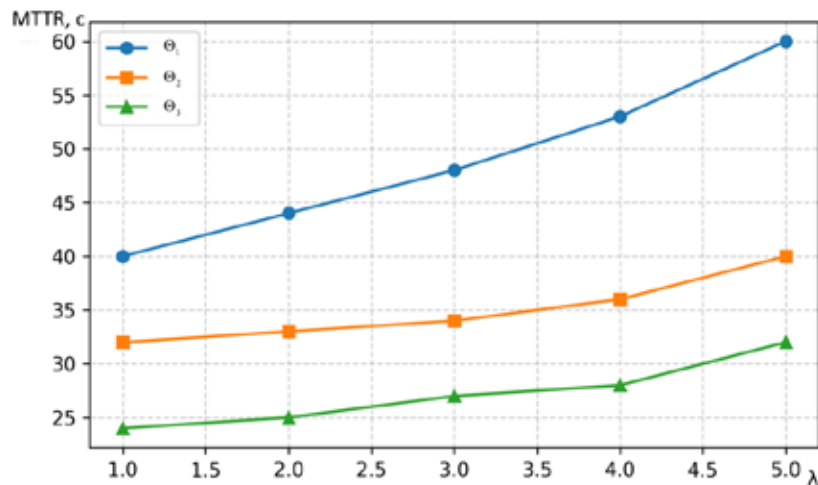
На рис. 2 показано залежність A_{crit} від інтенсивності відмов λ для трьох варіантів.

На рис. 2 крива для Θ_3 проходить вище за Θ_1 та Θ_2 у всьому досліджуваному діапазоні, що свідчить про більш стійку підтримку доступності при зростанні частоти відмов.

На рис. 3 наведено порівняння MTTR для різних методів. Для запропонованого методу Θ_3 спостерігається скорочення середнього часу відновлення на 20-30 % у порівнянні зі статичним підходом Θ_1 і на 10-15 % у порівнянні з Θ_2 .

Отримані результати показують, що за доступністю критичних функцій запропонований у цьому дослідженні метод забезпечує зростання A_{crit} у середньому на 2-3 відсоткові пункти відносно Θ_1 і на 4-6 відсоткових пунктів відносно Θ_2 . Це пов'язано з тим, що локальні агенти можуть швидко реагувати на відмови в різних фрагментах інформаційної системи паралельно, не чекаючи глобального оновлення стану всіх елементів.

За середнім часом відновлення Θ_3 дозволяє скоротити MTTR завдяки локальному прийняттю рішень та відсутності вузького місця у вигляді єдиного централізованого контролера. Це дає можливість пріоритизації заявок від різних структур із урахуванням їх критичності.

Рис. 2. Залежність A_{crit} від інтенсивності відмов λ Рис. 3. Залежність MTTR від інтенсивності відмов λ

За ефективністю використання сховища резервних ресурсів Θ_1 залишає значну частину ресурсу без використання для рідкісних, але критичних сценаріїв, Θ_2 частково усуває цей недолік, але його ефективність обмежена затримками збору загальносистемної телеметрії, а Θ_3 дозволяє більш гнучко перерозподіляти резервні ресурси між структурами, що зменшує частку невикористаного ресурсу й водночас зберігає запас для критичних функцій високого пріоритету.

Щодо накладних витрат у Θ_3 , то кількість службових повідомлень зростає лінійно з кількістю агентів, однак, за результатами моделювання, час прийняття колективного рішення про розподіл резерву залишається істотно меншим за характерні часові масштаби розвитку аварійних сценаріїв. За рахунок порогів активації ЛПАР та агрегації заявок для структур та рівнів накладні витрати можуть бути додатково зменшені без суттєвої зміни швидкості прийняття рішень.

Таким чином, результати імітаційного моделювання підтверджують, що запропонований у даному дослідженні метод адаптивного резервування ресурсів забезпечує кращий баланс між відмовостійкістю, ефективністю використання спільного сховища резервних ресурсів та масштабованістю в порівнянні зі статичним та централізованим підходом, особливо в умовах динамічно змінних режимів роботи багаторівневих структур складних інформаційних систем.

Висновки

У роботі вирішено науково-прикладну задачу розробки методу адаптивного резервування ресурсів у багаторівневих структурах складних інформаційних систем на основі мультиагентного підходу. Розглянуто інформаційну систему, що складається з сукупності взаємодіючих структур, кожна з яких має багаторівневу організацію та спільний пул резервних ресурсів. На цій основі запропоновано спосіб забезпечення відмовостійкості, коли

рішення щодо резервування приймаються не централізовано, а розподілено – програмними агентами, які діють локально на рівні елементів, рівнів і структур, але координуються через спільного агента резервних ресурсів.

Наукова новизна полягає в тому, що вперше запропоновано мультиагентний метод адаптивного резервування ресурсів у багаторівневих структурах складних інформаційних систем, у якому кожному елементу, рівню та структурі ставиться у відповідність програмний агент, здатний локально виявляти відмови та деградації й формувати формалізовані заявки на резерв, де використовується сховище резервних ресурсів для всієї інформаційної системи, доступ до якого здійснюється за допомогою координаційного протоколу, реалізованого агентом резервних ресурсів, а локальні рішення агентів узгоджуються між собою через ЛПАР, що враховують ризик відмов, критичність функцій, очікуване покращення показників якості та ресурсні витрати на резервування. На відміну від відомих підходів, орієнтованих переважно на конкретні архітектури чи окремі типи ресурсів або централізоване чи важке оптимізаційне управління, запропонований метод працює у загальній багаторівневій моделі складної інформаційної системи, одночасно враховує взаємодію структур, рівнів та елементів, підтримує паралельну роботу множини агентів і оперує спільним сховищем резервних ресурсів, що розподіляється з урахуванням пріоритетів критичних функцій в межах виконання основної функції інформаційною системою.

Дослідження ефективності запропонованого методу показало, що введення системи ЛПАР для агентів, що формально пов'язують ризик відмов, критичність функцій, дають очікуваний вииграш у показниках якості та вартості використання резерву. Побудова координаційного протоколу агента резервних ресурсів, який ранжує заявки, дає ефект накладання глобальних ресурсних обмежень та забезпечує недопущення використання більшої частини резервних ресурсів сховища для низько пріоритетних задач.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що запропонований метод може бути використаний як концептуальна основа для реалізації програмних агентів відмовостійкості в сучасних розподілених ІТ-системах (кластерних, хмарних, промислових IoT-платформах). Подальші дослідження доцільно спрямувати на формальне обґрунтування властивостей збіжності й оптимальності координаційного протоколу, побудову імітаційних і натурних експериментів для різних класів навантажень, а також інтеграцію елементів інтелектуального налаштування параметрів агентів без втрати формальних гарантій відмовостійкості.

Список використаної літератури

1. Models of Resilient Systems with Online Verification Considering Changing Requirements and Latent Failures / V. Kharchenko et al. *System Dependability – Theory and Applications*. Cham, 2024. P. 90–99. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-61857-4_9 (дата звернення: 16.11.2025).
2. Додонов О. Г., Кузнєцова М. Г., Горбачик О. С. Моделювання і оцінювання функціональної стійкості інформаційних систем. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2025. Т. 27, № 1. С. 76–88. URL: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2025.27.1.335752> (дата звернення: 16.11.2025).
3. Рубан І.В., Ткачов В.М. Модель міжрівневих порушень та політик відновлення інформаційної системи на мобільній платформі. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2025. № 3 (88). С. 205–221. URL: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.038721> (дата звернення: 16.11.2025).
4. Tkachov V., Mikhnov Y. Analysis of fault tolerance algorithms in multisegment networks. *Проблеми інформатизації: тези доп. 12-ї міжнар. наук.-техн. конф. Баку-Харків-Бельсько-Бяла*. Харків, 2024. Т. 2. С. 59.
5. A Novel Orchestrator Architecture for Deploying Virtualized Services in Next-Generation IoT Computing Ecosystems / F. Mahedero Biot et al. *Sensors*. 2025. Vol. 25, № 3. P. 718. URL: <https://doi.org/10.3390/s25030718> (дата звернення: 16.11.2025).
6. Alsheikh R.S., Fadel E.A., Akkari N.T. Distributed Software-Defined Networking Management: An Overview and Open Challenges. *ARO – The Scientific Journal of Koya University*. 2024. Vol. XII, № 2. URL: <https://doi.org/10.14500/aro.11468> (дата звернення: 16.11.2025).
7. Tkachov V., Hunko M., Volotka V. Scenarios for Implementation of Nested Virtualization Technology in Task of Improving Cloud Firewall Fault Tolerance. 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). Kyiv, Ukraine, 2019. P. 759–763. URL: <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061473> (дата звернення: 16.11.2025).
8. Lin J.-Y., Chou P.-H., Hwang R.-H. Dynamic Resource Allocation for Network Slicing with Multi-Tenants in 5G Two-Tier Networks. *Sensors*. 2023. Vol. 23, № 10. P. 4698. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/10/4698> (дата звернення: 16.11.2025).
9. Sifan Yu, Anlan Xie, Feng He, Luxi Zhao. Dynamic Resource Reservation for Deadline-Guaranteed Admission Control in Distributed Time-Sensitive Networking. 2025. Vol. 61. URL: <https://doi.org/10.1049/ell2.70350> (дата звернення: 16.11.2025).
10. Adaptive and Collaborative Hierarchical Optimization Strategies for a Multi-Microgrid System Considering EV and Storage / Y. He et al. *World Electric Vehicle Journal*. 2025. Vol. 16, № 7. P. 363. URL: <https://doi.org/10.3390/wevj16070363> (дата звернення: 16.11.2025).

11. Method to Determine Fault-Tolerant Performance Probability of High-Survivability Computer Network based on Mobile Platform / V. Tkachov et al. 2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S\&T). Kharkiv, Ukraine, 2021. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/PICST54195.2021.9772202> (дата звернення: 16.11.2025).

12. Reliability prediction and evaluation of communication base stations in earthquake prone areas / X. Li et al. Scientific Reports. 2023. Vol. 13, № 1. P. 8981. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35841-x> (дата звернення: 16.11.2025).

13. Ткаченко О., Чепурна І. Метод забезпечення відмовостійкості мікросервісів у AWS. Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: тези доп. XV міжнар. наук.-техн. конф. 2025. Т. 2. С. 44.

14. Frolov D. Y. Mathematical model of a multilayer information system for stream data processing. Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті : матеріали 29-го Міжнар. молодіж. форуму, 16–19 квітня 2025 р. Харків, 2025. Т. 5. С. 11–12.

15. Лисенко С. М., Харченко В. С., Бобровнікова К. Ю., Щука Р. В. Резильєнтність комп'ютерних систем в умовах кіберзагроз: таксономія та онтологія. Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2020. № 1. С. 17–28.

16. Kosińska J., Zieliński K. Enhancement of Cloud-Native Applications with Autonomic Features. Journal of Grid Computing. 2023. Vol. 21, № 3. P. 44. URL: <https://doi.org/10.1007/s10723-023-09675-w> (дата звернення: 16.11.2025).

17. A survey on fault-tolerant consensus control of multi-agent systems: trends, methodologies and prospects / C. Gao et al. International Journal of Systems Science. 2022. Vol. 53. № 13. P. 2800–2813. URL: <https://doi.org/10.1080/00207721.2022.2056772> (дата звернення: 16.11.2025).

18. Dui H., Xu H., Zhang Y.-A. Reliability Analysis and Redundancy Optimization of a Command Post Phased-Mission System. Mathematics, 2022. Vol. 10, № 22. P. 4180. URL: <https://doi.org/10.3390/math10224180> (дата звернення: 16.11.2025).

19. Khare P., Reddy M. J. B. Wide Area Measurement-Based Centralized Power Management System for Microgrid with Load Prioritization. Energies, 2025. Vol. 18, № 9. P. 2289. URL: <https://doi.org/10.3390/en18092289> (дата звернення: 16.11.2025).

References

1. Kharchenko, V., Ponochovnyi, Y., Dotsenko, S., Illiashenko, O., & Ivasiuk, O. (2024). Models of Resilient Systems with Online Verification Considering Changing Requirements and Latent Failures. In International Conference on Dependability of Computer Systems (pp. 90-99). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61857-4_9

2. Dodonov, O. H., Kuznietsova, M. H., & Horbachyk, O. S. (2025). Modeliuvannya i otsiniuvannya funktsionalnoi stiiokosti informatsiinykh system. Reiestratsiia, zberihannya i obrobka danykh, 27(1), 76-88.

3. Ruban, I., & Tkachov, V. (2025). Model mizhrivnevnykh porushen ta polityk vidnovlennia informatsiinoi systemy na mobilnii platformi. Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii, (3), 204-221. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.038721>

4. Tkachov, V., & Mikhnov, Y. (2024). Analysis of fault tolerance algorithms in multisegment networks. Problemy informatyzatsii: tezy dop. 12-yi mizhnar. nauk.-tekhn. Konf, 2, p.59

5. Biot, F. M., & others. (2025). A Novel Orchestrator Architecture for Deploying Virtualized Services in Next-Generation IoT Computing Ecosystems. Sensors, 25(3), 718. <https://doi.org/10.3390/s25030718>

6. Alsheikh, R., Fadel, E., & Akkari, N. (2024). Distributed Software-Defined Networking Management: An Overview and Open Challenges. ARO – The Scientific Journal of Koya University, XII(2). <https://doi.org/10.14500/aro.11468>

7. Tkachov, V., Hunko, M., & Volotka, V. (2019). Scenarios for Implementation of Nested Virtualization Technology in Task of Improving Cloud Firewall Fault Tolerance. In 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S\&T) (pp. 759–763). <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061473>

8. Lin, J.-Y., Chou, P.-H., & Hwang, R.-H. (2023). Dynamic Resource Allocation for Network Slicing with Multi-Tenants in 5G Two-Tier Networks. Sensors, 23(10), 4698. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/10/4698>

9. Yu, S., Xie, A., He, F., & Zhao, L. (2025). Dynamic Resource Reservation for Deadline-Guaranteed Admission Control in Distributed Time-Sensitive Networking. Electronics Letters, 61. <https://doi.org/10.1049/ell2.70350>

10. He, Y., & others. (2025). Adaptive and Collaborative Hierarchical Optimization Strategies for a Multi-Microgrid System Considering EV and Storage. World Electric Vehicle Journal, 16(7), 363. <https://doi.org/10.3390/wevj16070363>

11. Tkachov, V., & others. (2021). Method to Determine Fault-Tolerant Performance Probability of High-Survivability Computer Network based on Mobile Platform. In 2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S\&T) (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/PICST54195.2021.9772202>

12. Li, X., & others. (2023). Reliability prediction and evaluation of communication base stations in earthquake prone areas. *Scientific Reports*, 13(1), 8981. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35841-x>
13. Tkachenko, O., & Chepurna, I. (2025). Metod zabezpechennia vidmovostiikosti mikroservisiv u AWS. U Suchasni napriamy rozvytku informatsiino-komunikatsiinykh tekhnolohii ta zasobiv upravlinnia: tezy dop. XV mizhnar. nauk.-tekhn. konf. (p. 44).
14. Frolov, D. Y. (2025). Mathematical model of a multilayer information system for stream data processing. In *Radioelektronika ta molod u XXI stolitti: materialy 29-ho Mizhnar. molodizh. forumu.* (pp. 11–12).
15. Lysenko, S., Kharchenko V., Bobrovnikova K., & Shchuka R. (2020). Rezylientnist kompiuternykh system v umovakh kiberzahroz: taksonomiia ta ontolohiia. *Radioelektronni i kompiuterni systemy*, (1), 17–28.
16. Kosińska, J., & Zieliński, K. (2023). Enhancement of Cloud-Native Applications with Autonomic Features. *Journal of Grid Computing*, 21(3), 44. <https://doi.org/10.1007/s10723-023-09675-w>
17. Gao, C., & al., e. (2022). A survey on fault-tolerant consensus control of multi-agent systems: trends, methodologies and prospects. *International Journal of Systems Science*, 53(13), pp.2800–2813. <https://doi.org/10.1080/00207721.2022.2056772>
18. Dui, H., Xu, H., & Zhang, Y.-A. (2022). Reliability Analysis and Redundancy Optimization of a Command Post Phased-Mission System. *Mathematics*, 10(22), 4180. <https://doi.org/10.3390/math10224180>
19. Khare, P., & Reddy, M. J. B. (2025). Wide Area Measurement-Based Centralized Power Management System for Microgrid with Load Prioritization. *Energies*, 18(9), 2289. <https://doi.org/10.3390/en18092289>

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

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

О. В. КОЧЕТКОВ

магістрант кафедри інженерії програмного забезпечення
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій
ORCID: 0009-0000-6678-6884

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ДЛЯ ВИБОРУ НАЙКРАЩОЇ КОНФІГУРАЦІЇ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Самостійна збірка комп'ютера є виправданою та вигідною стратегією для багатьох користувачів, дає значні переваги перед купівлею готової системи. Зокрема, це найкраща результативність витрат та економія, ідеальна адаптація до потреб користувача, можливість самому модернізувати, відремонтувати, здійснювати контроль якості комплектуючих. Допомогти самостійно зібрати комп'ютер можуть спеціалізовані рекомендаційні системи – онлайн-конфігуратори, які максимально дозволяють спростити та убезпечити процес підбору комплектуючих.

Дана стаття присвячена розробці гібридної рекомендаційної системи, алгоритм роботи якої поєднує методи обробки природної мови, евристичний генетичний пошук та генеративні можливості нейромережевої моделі.

На основі аналізу науково-технічної літератури формалізована задача підбору комплектуючих як задача багатокритеріальної оптимізації. Розв'язання даної задачі представлено за допомогою генетичного алгоритму. Завдяки генетичному алгоритму система здатна знайти близькі до оптимальних конфігурації із великого комбінаторного простору варіантів, а використання ChatGPT для генерації пояснень підвищує якість інтерпретації результатів для кінцевого користувача.

У дослідженні представлена архітектура запропонованої методики автоматизованого підбору комплектуючих для комп'ютерних систем, яка складається з декількох взаємодіючих компонентів, а саме, користувацький інтерфейс, модуль обробки запитів природною мовою, оптимізаційний модуль (генетичний алгоритм), модуль генерації відповіді (на базі ChatGPT) та реляційна база даних компонентів.

У статті подано основні кроки алгоритму конфігуратора, в кожному з яких описано початкові дані на вході і дані на виході.

Результати дослідження можуть бути використані закладами вищої освіти та навчальними центрами для модернізації навчальних програм та підвищення якості підготовки фахівців у сфері програмної інженерії.

Ключові слова: генетичні алгоритми, багатокритеріальна оптимізація, штучний інтелект, конфігуратор, автоматизований підбір комплектуючих, бюджетні обмеження; сумісність.

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

O. V. KOCHETKOV

Master's Student at the Department of Software Engineering
State University of Information and Communication Technologies
ORCID: 0009-0000-6678-6884

MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION FOR SELECTING THE BEST CONFIGURATION OF COMPUTER SYSTEMS

Self-assembly of a computer is a justified and profitable strategy for many users, it provides significant advantages over purchasing a ready-made system. In particular, it is the best cost-effectiveness and savings, perfect adaptation to the user's needs, the ability to upgrade, repair, and control the quality of components yourself. Specialized recommendation systems – online configurators, which allow you to simplify and secure the process of selecting components as much as possible, can help you assemble a computer yourself.

This article is devoted to the development of a hybrid recommendation system, the algorithm of which combines natural language processing methods, heuristic genetic search, and generative capabilities of a neural network model.

Based on the analysis of scientific and technical literature, the problem of component selection is formalized as a multi-criteria optimization problem. The solution of this problem is presented using a genetic algorithm. Thanks to the genetic algorithm, the system is able to find close to optimal configurations from a large combinatorial space of options, and the use of ChatGPT to generate explanations improves the quality of interpretation of the results for the end user.

The study presents the architecture of the proposed method for automated selection of components for computer systems, which consists of several interacting components, namely, a user interface, a natural language query processing module, an optimization module (genetic algorithm), a response generation module (based on ChatGPT), and a relational database of components.

The article presents the main steps of the configurator algorithm, each of which describes the initial input data and output data.

The results of the study can be used by higher education institutions and training centers to modernize curricula and improve the quality of training of specialists in the field of software engineering.

Key words: genetic algorithms, multi-criteria optimization, artificial intelligence, configurator, automated selection of components, budget constraints; compatibility.

Постановка проблеми

Для більшості користувачів персональний комп'ютер (ПК) є інструментом для виконання відповідних завдань: професійна діяльність, ігри, навчання тощо. Очевидно, що кожен ПК так чи інакше має бути підлаштованим під вимоги власника. Людина, яка не хоче перейматися вибором компонентів, купує готовий продукт, інші користувачі обирають системи, зібрані за їх індивідуальним замовленням, що є бюджетно накладним. Тому для тих, хто є професіоналом у цій сфері, найкращий спосіб отримати комп'ютер під свої високі вимоги з мінімальним бюджетом є самостійна збірка компонентів.

Проте сьогодні цей процес є набагато доступнішим завдяки існуванню спеціалізованих рекомендаційних систем, що дозволить недосвідченим користувачам у цій сфері отримати саме той ПК, який відповідає їхнім бажанням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасний світ характеризується інтенсивним розвитком інформаційних технологій, що дозволяє автоматизувати процеси у різних сферах людської діяльності. Тому питання оптимізації конфігурації комп'ютерних систем набуває важливого значення. Необхідність узгодження широкого спектра доступних апаратних компонентів із фінансовими лімітами вимагає розробки інтелектуальних рішень, які дозволяють модернізувати комп'ютерну систему до вимог користувача. Останній може бути і не професіоналом у цій сфері, що робить такі системи надзвичайно затребуваними.

У цьому руслі цікава розробка [1], автори якої представили систему рекомендацій для пошуку компонентів ПК. В основі цієї технології лежить генетичний алгоритм. Його було обрано через здатність ефективно досліджувати великий простір можливих конфігурацій за допомогою операторів кросоверу та мутації, генеруючи різноманітні альтернативи. Такий підхід переважає над простими жадібними алгоритмами, що можуть давати субоптимальні рішення, і є значно швидшим за повний перебір усіх комбінацій.

Слід відзначити дослідження [2], автори якого запропонували систему рекомендацій щодо конфігурації компонентів ПК у вигляді вебдодатку. У даній технології використовували колаборативну фільтрацію.

Нам імпонує практична розробка системи аналізу комп'ютерних компонентів для удосконалення проектування ПК, їх повного аналізу та оптимізації інформаційно-технічної допомоги користувачам на основі алгоритму гібридної рекомендаційної системи авторів [3]. Вони вважають, що для рекомендацій краще використовувати груповий підхід, а не індивідуальний, а для пошуку груп використали змішаний категоріально-числовий метод кластеризації та гібридний метод на основі коефіцієнта розрідженості.

Аналіз інформаційних джерел дозволив виділити як світові, так і локальні (українські) сервіси, які допомагають користувачам у збірці ПК. У таблиці 1 представлені деякі з них та їх характеристики.

Таблиця 1.

Порівняльний аналіз сучасних конфігураторів

Метод	Класичний ручний підбір	Онлайн-конфігуратори інтернет-магазинів	Спеціалізовані калькулятори (типу be quiet! PSU Calculator) [4]	Пошук через прайс-агрегатори та фільтри
Принцип роботи	Користувач самостійно підбирає комплектуючі за оглядами, форумами, порадами знайомих, порівнює характеристики та ціни на різних сайтах.	Користувач поетапно обирає компоненти з каталогу магазину; система частково відсікає несумісні варіанти та рахує загальну вартість збірки.	Користувач вводить вже сформовану або бажану конфігурацію, сервіс оцінює споживання енергії та підбирає відповідний блок живлення з певного модельного ряду.	Користувач задає діапазон цін і базові параметри (тип сокету, обсяг пам'яті тощо) в каталозі, а потім вручну комбінує вибрані деталі у збірку.
Ключові недоліки	Велика витрата часу; потрібні глибокі технічні знання; високий ризик помилок сумісності; відсутня автоматична оптимізація під бюджет та наявну конфігурацію.	Прив'язані до асортименту одного магазину; обмежена перевірка сумісності; зазвичай немає режиму «апгрейд існуючого ПК»; немає інтелектуальної оптимізації продуктивності/ціна, лише підрахунок суми.	Розв'язує лише вузьку задачу вибору блока живлення; не підбирає інші компоненти; не враховує бюджет та актуальні ціни; не пропонує альтернативних збалансованих конфігурацій.	Кожен компонент підбирається окремо; сумісність перевіряється вручну; складно отримати цілісний «оптимальний набір»; важко збалансувати продуктивність і вкластися в бюджет.

Актуальність даної проблеми, її доцільність є обґрунтованими даного дослідження, присвяченого багатокритеріальній оптимізації для вибору найкращої конфігурації компонентів в персональному комп'ютері.

Формулювання мети дослідження

Окреслене визначило мету нашого дослідження – формалізувати задачу підбору конфігурації як задачу багатокритеріальної оптимізації та представити гібридний алгоритм такого конфігуратора з використанням методів NLP, що дозволить удосконалити процес збірки ПК самостійним чином.

Викладення основного матеріалу дослідження

1. Формалізація задачі підбору конфігурації

Формалізацію задачі підбору конфігурації компонентів в ПК розглянемо як задачу багатокритеріальної оптимізації. Багатокритеріальна конфігурація – це процес одночасної оптимізації двох або більше конфліктуючих цільових функцій в заданій області [5, 6]. Постановка задачі оптимізації конфігурації ПК виглядає наступним чином.

1. Визначення множин та змінних

C – множина типів компонентів, необхідних для збірки ПК. Наприклад,

$$C = \{CPU, GPU, \dots\}$$

A_c – множина всіх доступних артикулів моделей для типу $c \in C$. Наприклад,

$$A_{CPU} = \{Intel i5-14600K, \dots\}$$

$$x_{c,a} = \begin{cases} 1, & \text{якщо обрано модель } a \in A_c, \\ 0, & \text{в протилежному випадку,} \end{cases} \text{ – бінарна змінна рішення.}$$

Наприклад, $x_{CPU,i5-14600K}$.

2. Характеристики компонентів

$P_{c,a}$ – продуктивність моделі a типу c ,

$V_{c,a}$ – вартість моделі a типу c ,

$W_{c,a}$ – енергоспоживання (теплової енергії) моделі a типу c ,

$S_{c,a}$ – характеристики сумісності

3. Цільова функція (фітнес-функція)

$$\max \sum_{c \in \mathcal{C}} \sum_{a \in \mathcal{A}_c} \omega_c \cdot P_{c,a} \cdot x_{c,a},$$

де ω_c – ваговий коефіцієнт, що відображає важливість компонента типу c для фінальної продуктивності, знайдене експертним методом.

4. Обмеження

Обмеження вибору: для кожного типу $c \in \mathcal{C}$ можна вибрати лише одну модель.

$$\sum_{a \in \mathcal{A}_c} x_{c,a} = 1, \forall c \in \mathcal{C}$$

Обмеження бюджету: загальна вартість компонентів не повинна перевищувати заданий грошовий поріг.

$$\sum_{c \in \mathcal{C}} \sum_{a \in \mathcal{A}_c} Y_{c,a} \cdot x_{c,a} \leq B_{\max}.$$

Обмеження сумісності: усі обрані S моделі мають бути сумісні. Використовується бінарна деривація $S_c(x)$, яка дорівнює 1 якщо обмеження порушено, 0 – у протилежному випадку.

Обмеження потужності: сумарне енергоспоживання обраних ключових компонентів не повинно перевищувати потужність обраного блоку живлення з певним запасом Δ .

$$\sum_{a \in \mathcal{A}_{core}} W_{c,a} \cdot x_{c,a} + \sum_{b \in \mathcal{A}_{periph}} W_{b,a} \cdot x_{b,a} \leq \sum_{d \in \mathcal{A}_{PSU}} (W_{PSU,d} - \Delta) \cdot x_{PSU,d}.$$

2. Генетичні алгоритми

Розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації з використанням генетичних алгоритмів вперше запропонував Річард Розенберг [7, 8].

Генетичні алгоритми були відкриті Джоном Голландом у 1960-х роках [9]. Науковець ставив за мету формалізувати феномен адаптації у природі та імпортувати ці механізми природної адаптації в комп'ютерні системи. Генетичний алгоритм працює шляхом ініціалізації популяції випадкових рішень, які потім ітераційно оцінюються за пристосованістю, а найкращі рішення відбираються та комбінуються за допомогою кросовера та мутації для створення кращого наступного покоління [1, 7 – 14].

Генетичний алгоритм – ітераційний метод, узагальнена блок-схема якого представлена на рис. 1 [11, 13].

Завдяки ефективній паралелізації еволюційних алгоритмів на сучасних обчислювальних платформах, генетичні алгоритми з великою кількістю індивідів та епох навчання можуть швидко знаходити якісні рішення для широкого спектру задач, включаючи виявлення шаблонів, обробку сигналів та навчання нейронних мереж тощо [14].

Застосування генетичного алгоритму у даному дослідженні представлено нижче.

3. Логічна структура системи

Архітектура запропонованої методики автоматизованого підбору комплектуючих для комп'ютерних систем складається з декількох взаємодіючих компонентів. Основними модулями є: користувацький інтерфейс, модуль обробки запитів природною мовою, оптимізаційний модуль (генетичний алгоритм), модуль генерації відповіді (на базі ChatGPT) та реляційна база даних компонентів. Кожен з цих компонентів відіграє чітко визначену роль у загальній системі, забезпечуючи узгоджену роботу від моменту введення запиту користувача до формування рекомендації. Розгляньмо сутнісні характеристики кожного компонента більш детально.

Користувацький інтерфейс (веб-застосунок) – реалізований на основі Flask (Python) сервер, забезпечує взаємодію із користувачем. Він приймає запит у вигляді природно-мовного тексту (наприклад, користувач вводить: «Я хочу зібрати ПК для ігор з бюджетом до 30000 грн»), передає його в систему та відображає отриману відповідь. Інтерфейс є точкою доступу до функціоналу конфігуратора, надаючи зручну форму введення вимог та отримання результатів.

Модуль обробки запитів – відповідає за Natural Language Processing (NLP) запиту, тобто розбір тексту користувача і виділення ключових параметрів. Цей модуль аналізує вхідне речення, визначаючи тип бажаного використання системи (ігровий, офісний, для дизайну тощо), бюджетні обмеження (сума в гривнях) та особливі умови (які компоненти потрібно залишити або замінити). Для цього можуть застосовуватися як прості лінгвістичні правила (пошук ключових слів: «ігор», «офісний», розпізнавання числових даних і валюти), так і спеціалізовані моделі обробки мови. В результаті модуль формує структуру запиту: наприклад, із фрази «Мені потрібен офісний комп'ютер, залишаючи SSD і БЖ зі старої збірки» буде отримано, що користувач потребує конфігурацію для офісної роботи, явного бюджету не зазначено, але слід залишити наявний SSD-накопичувач та блок живлення (БЖ) з попередньої системи. Ці виділені параметри передаються на наступні етапи системи.

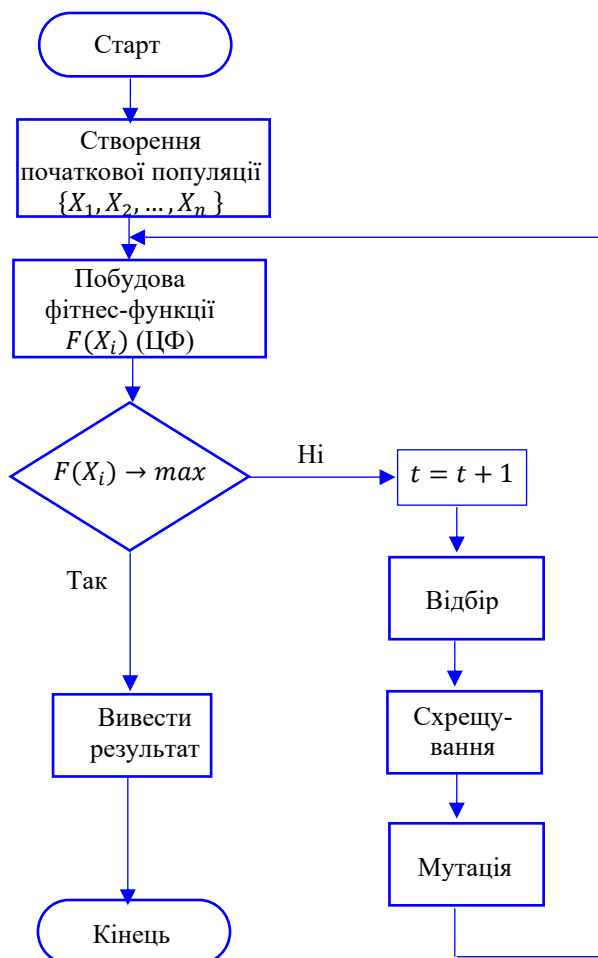


Рис. 1. Блок-схема генетичного алгоритму

База даних компонентів – реляційна база даних (SQLite) містить інформацію про апаратні комплектуючі. Дані організовані за категоріями компонентів: процесори, материнки, модулі пам'яті, графічні карти, накопичувачі, блоки живлення тощо. Для кожного компоненту зберігаються опис, технічні характеристики (наприклад, сокет CPU, чипсет материнської плати, тип і обсяг пам'яті, потужність БЖ), поточна ціна та відомості про сумісність. Сумісність може бути закодована через атрибути (наприклад, процесор має поле «Socket», яке повинно співпасти з полем «Socket» материнської плати; форм-фактор оперативної пам'яті DDR4/DDR5 повинен підтримуватися материнською платою тощо). База даних слугує знаннями для системи: оптимізаційний модуль звертається до неї, щоб отримати списки доступних компонентів та їх параметри, а модуль відповіді може використовувати описи при формуванні рекомендації.

Оптимізаційний модуль (генетичний алгоритм) – ядро системи, яке виконує пошук оптимальної конфігурації під задані критерії. Він отримує від модуля обробки запиту визначені вимоги (тип використання, бюджет, фіксовані чи виключені компоненти) та звертається до бази даних за переліком доступних компонентів. Цей модуль реалізує генетичний алгоритм (ГА) для комбінаторної оптимізації вибору компонентів. Оптимізаційний модуль враховує обмеження сумісності і бюджету при формуванні нових рішень: якщо користувач позначив деякі компоненти як такі, що треба залишити, алгоритм фіксує їх у конфігурації і не замінює. Решта компонентів добираються алгоритмом із урахуванням технічної сумісності (забороняються несумісні за сокетом або інтерфейсами поєднання) та таким чином, щоб сумарна вартість не перевищувала бюджет.

Модуль оцінки та вибору – підмодуль всередині оптимізаційного блока, який відповідає за обчислення функції пристосованості (fitness function) для кожної згенерованої конфігурації та вибір найкращих рішень. Для оцінки конфігурації можуть застосовуватися кількісні критерії, що відбивають продуктивність системи для заданого типу використання. Зокрема, кожному компоненту може бути приписаний показник продуктивності (наприклад, бал бенчмарку або відносна потужність), і на основі цього обчислюється сумарний рейтинг продуктивності системи. Щоб врахувати специфіку використання, вводяться вагові коефіцієнти: наприклад, для ігрового ПК внесок

потужності GPU (відеокарти) у рейтинг більший, ніж для офісного ПК, де важливіше швидкодія CPU та накопичувача. Нейромережева модель (за наявності) може бути інтегрована на цьому етапі для оцінки сумісності та продуктивності складних комбінацій компонентів. Зокрема, нейронна мережа може прогнозувати узгодженість роботи компонентів (виявлення “вузьких місць”, коли, наприклад, надто потужна відеокарта не розкривається через слабкий CPU) та давати інтегральний показник ефективності системи. Враховуючи такі оцінки, генетичний алгоритм відбирає найбільш перспективні рішення за допомогою оператора відбору (наприклад, турнірного відбору) для подальшого схрещування.

Модуль генерації відповіді (з використанням ChatGPT) – завершує цикл роботи системи, формуючи кінцеву рекомендацію у вигляді текстового висновку для користувача. Після того, як оптимізаційний модуль визначив одну або кілька оптимальних конфігурацій, вибрана конфігурація передається в модуль генерації відповіді. Цей модуль використовує можливості великої мовної моделі ChatGPT для аналізу отриманої конфігурації та пояснення вибору компонентів. ChatGPT (Generative Pre-trained Transformer від OpenAI) – це сучасна нейромережева модель, здатна генерувати зв’язний і контекстно обґрунтований текст на основі вхідних даних [15]. У нашій системі вона слугує для забезпечення кращого пояснення та обґрунтування причин рекомендацій: модель аналізує, як підібрані комплектуючі задовольняють вимоги користувача, та формує роз’яснення зрозумілою мовою. Зокрема, генерується опис того, чому обрано саме ці компоненти, як вони забезпечують потрібний рівень продуктивності, чи не виходить за бюджет, які переваги надає збереження певних старих комплектуючих тощо. Результат роботи цього модуля – детальна текстова рекомендація, яка включає список підібраних компонентів та обґрунтування вибору – надсилається назад до користувацького інтерфейсу для відображення користувачу.

Взаємодія компонентів – усі зазначені модулі інтегровані в єдину систему через серверну логіку Flask. Запит від інтерфейсу послідовно проходить через модуль обробки мови до оптимізаційного модуля; останній здійснює пошук у просторі даних, що зберігаються в базі, і обирає оптимальне рішення; далі модуль генерації відповіді формує людинозрозумілий висновок. Така багаторівнева архітектура забезпечує гнучкість: можна оновлювати базу даних новими компонентами без зміни алгоритму, вдосконалювати NLP-модуль або підключати більш потужні методи оптимізації чи нейромережеві моделі без перегляду роботи інших компонентів. Система модульна, що полегшує її підтримку та подальший розвиток. На рис. 2 представлена архітектура системи та взаємодія її компонентів.

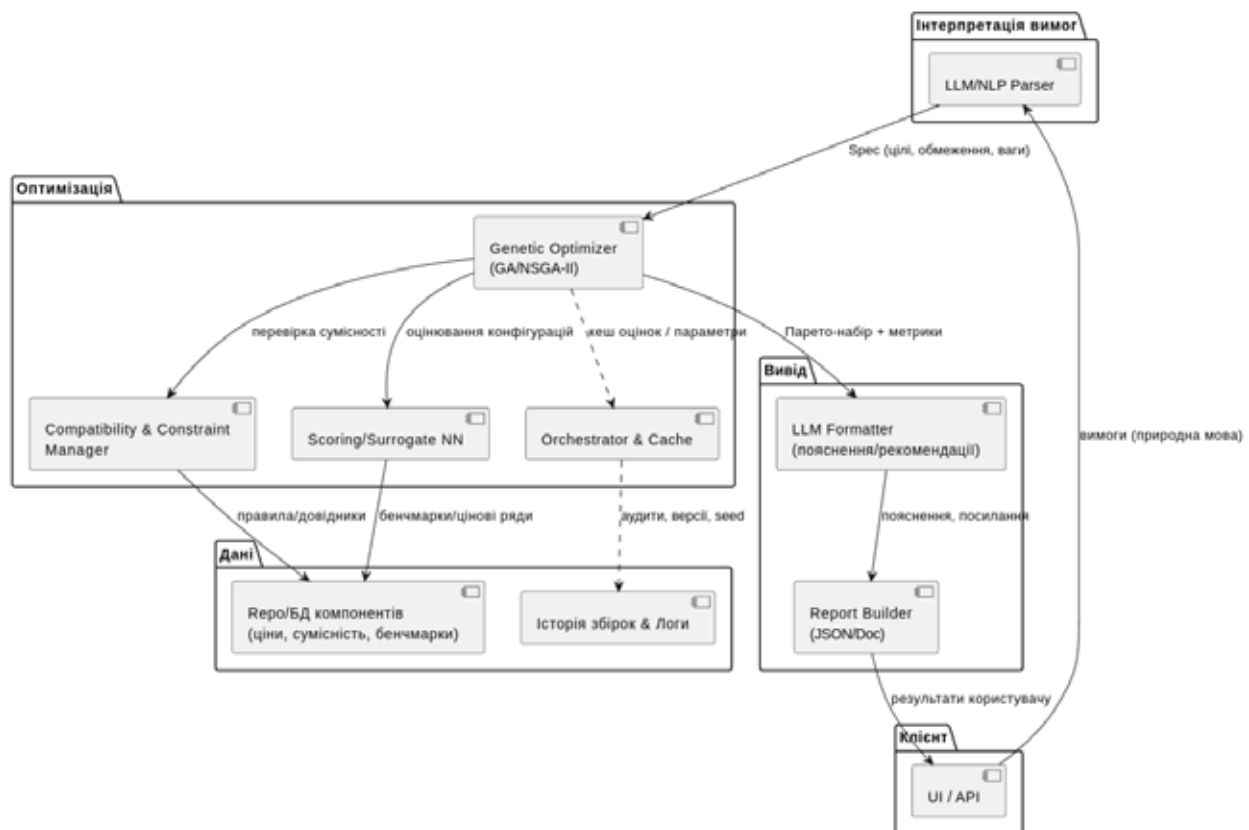


Рис. 2. Архітектура методики автоматизованого підбору комплектуючих для комп’ютерних систем

4. Алгоритм роботи конфігуратора

Алгоритм функціонування конфігуратора є послідовністю кроків, що трансформують початковий текстовий запит у конкретну рекомендацію з поясненнями. Нижче подано детальний покроковий опис цього процесу – від введення користувачем своїх вимог до отримання згенерованої відповіді:

1. Введення запиту користувача

Користувач формує запит у довільній формі природною мовою через вебінтерфейс. Запит може містити бажаний сценарій використання, орієнтовний бюджет та додаткові умови щодо компонентів. Наприклад, запит типу «Я хочу зібрати ПК для ігор з бюджетом до 30000 грн» вказує на потребу в ігровому комп'ютері з обмеженням вартості ~30000 грн, тоді як фраза «Мені потрібен офісний комп'ютер, залишаючи SSD і БЖ зі старої збірки» задає офісний профіль системи, без прямого зазначення бюджету, але з вимогою повторно використати наявний SSD-накопичувач та блок живлення. Користувацький інтерфейс передає текст запиту до серверної частини для обробки.

2. Аналіз і розбір запиту (NLP)

На цьому етапі модуль обробки природної мови аналізує текст запиту. Застосовуються методи NLP для вилучення структурованих параметрів:

1) тип використання: класифікується на основі ключових слів (наприклад, «для ігор» → ігровий, «офісний комп'ютер» → офісний). Можливі категорії включають ігровий, офісний, графічний дизайн, серверний тощо;

2) бюджет: розпізнаються числові значення та валюта. Якщо бюджет явно не вказано, система може використовувати дефолтні значення або запитати уточнення. У випадку з прикладами вище, перший запит дає бюджет 30000 грн, а другий – бюджет не задано (система може припустити мінімально необхідний або середній бюджет для офісного ПК);

3) фіксовані/старі компоненти: виявляються згадки про існуючі комплектуючі, які слід залишити («SSD», «БЖ» тощо) чи замінити. Система ідентифікує типи цих компонентів (накопичувач, блок живлення) і помічає їх як такі, що не потребують підбору нових аналогів;

4) інші обмеження або побажання: наприклад, уподобання брендів чи технологій (типу «віддаю перевагу CPU Intel» або «хочу GPU з підтримкою RTX») – такі деталі також можуть бути враховані, якщо система їх розпізнає.

Результатом цього кроку є набір структурованих даних про запит: {тип: «офісний», бюджет: null, залишити: [«SSD», «БЖ»], ...} для другого прикладу. Ці дані передаються далі в алгоритм.

3. Підготовка даних та початковий пошук компонентів

Оптимізаційний модуль отримує структурований запит і звертається до бази даних за списками доступних компонентів кожного типу. На цьому кроці можуть застосовуватися попередні фільтри:

1) виключаються категорії компонентів, які користувач планує залишити зі старої системи (наприклад, якщо вирішено залишити SSD і БЖ, то зі списків нових компонентів вилучаються всі накопичувачі та блоки живлення – оскільки їх купувати не потрібно);

2) можуть застосовуватися обмеження мінімальних вимог відповідно до типу використання: наприклад, для ігрового ПК система може відфільтрувати лише відеокарти не нижче середнього рівня та CPU з ≥ 4 ядрами, щоб прискорити пошук рішень;

3) якщо задано бюджет, можливо виключити компоненти, ціна яких явно не вписується (надто дорогі компоненти можуть відсіюватися, щоб не витратити час на явно неприпустимі комбінації);

4) виконується перевірка базової сумісності: наприклад, якщо користувач залишає стару материнську плату, вже на цьому етапі можна обмежити вибір процесорів лише тими, що підтримують відповідний сокет, і навпаки.

Таким чином, формується початковий пул сумісних компонентів-кандидатів по кожній необхідній категорії (CPU, GPU, RAM, тощо), який буде використовувати генетичний алгоритм.

4. Ініціалізація генетичного алгоритму

Генетичний алгоритм починає роботу зі створення початкової популяції конфігурацій. Кожна потенційна конфігурація може бути подана у вигляді хромосоми – наприклад, як набір генів, що кодують вибір конкретних компонентів (ID процесора, ID материнської плати, ID GPU, тощо). Спочатку генерується декілька десятків або сотень випадкових конфігурацій, які відповідають базовим обмеженням:

1) кожна конфігурація містить по одному компоненту з кожної необхідної категорії (окрім тих, що фіксовані користувачем). Наприклад, якщо потрібно підібрати CPU, материнську плату, ОЗП, відеокарту і корпус (решту залишають старими), то ген в цих позиціях випадково обирається з відповідного списку доступних компонентів;

2) випадкове генерування відбувається з перевіркою сумісності: якщо згенерована комбінація містить несумісну пару (скажімо, CPU з сокетом AM5 та материнку під LGA1700), така конфігурація відбраковується або коригується. Таким чином, початкова популяція вже складається з фізично здійснених варіантів збірки;

3) переконаємося, що жодна конфігурація не перевищує бюджет (якщо деякі випадкові комбінації виходять за межі бюджету, вони або відхиляються, або включаються з позначкою штрафу за перевищення);

4) оцінка пристосованості (fitness) конфігурацій: для кожної конфігурації в популяції обчислюється значення цільової функції – показник, який відображає, наскільки добре дана комбінація відповідає вимогам користувача. Цей показник формується на основі:

– продуктивності: агрегований бал продуктивності системи може розраховуватися з використанням технічних параметрів і вагових коефіцієнтів для кожного компонента, знайдених за допомогою експертного методу. Наприклад, для CPU – бали тестів (benchmark score), для GPU – продуктивність у 3D-графіці, для дисків – швидкість I/O, зведені до спільної шкали. Далі для ігрового ПК сумарний бал: $0.5\text{CPU_score} + 0.3\text{GPU_score} + 0.1\text{RAM_score} + 0.1\text{Disk_score}$ (умовно), тоді як для офісного може бути $0.4\text{CPU} + 0.1\text{GPU} + 0.3\text{RAM} + 0.2\text{Disk}$. Ці ваги відображають важливість компонентів під конкретні завдання;

– відповідності бюджету: якщо конфігурація не перевищує бюджет, вона отримує повний бал за цим критерієм; якщо ж перевищує (у випадку відсутності явного відсіювання), може застосовуватися штраф або нульова придатність, щоб такі рішення не еволюціонували далі. У разі відсутності заданого бюджету, критерій може бути мінімізувати вартість або співвідносити продуктивність з ціною;

– сумісності та збалансованості: конфігурація отримує додаткові бали або штрафи за більш збалансований підбір компонентів. Наприклад, якщо всі компоненти сумісні (що обов'язково), а також добре узгоджені за класом – немає явних “перекосів” (типовий приклад перекоосу: надпотужний GPU в парі зі слабким CPU, що призведе до недовикористання потенціалу GPU). Для кількісної оцінки такого балансу може використовуватися окрема модель. Нейронна мережа, навчена на даних про різні збірки, може передбачати коефіцієнт узгодженості системи, який враховується в fitness-функції. Така модель на вході отримує параметри вибраних CPU, GPU, ОЗП тощо, і видає оцінку, наскільки ефективно вони працюватимуть разом. Ця оцінка додається до загальної пристосованості конфігурації.

У підсумку, кожна конфігурація має чисельний рейтинг придатності. Конфігурації, що не відповідають критичним обмеженням (несумісні чи значно перевищують бюджет), отримують вкрай низький рейтинг або вилучаються з популяції.

5. Генетична еволюція рішень

Після оцінки поточної популяції застосовується власне ітеративний процес генетичного алгоритму. Відповідно до обчислених fitness-значень виконується відбір батьківських конфігурацій – кращі рішення мають вищі шанси бути обраними для породження нового покоління. Використовується, метод турнірного відбору чи рулетки. Далі здійснюються генетичні оператори:

1) кросовер (схрещування): випадковим чином вибираються одна або кілька позицій у хромосомі, і дві батьківські конфігурації обмінюються частиною компонентів. Це дає наслідків – нові конфігурації, що комбінують риси обох батьків. Наприклад, від одного батька успадковується CPU і материнська плата, від іншого – GPU і решта компонентів, утворюючи змішану конфігурацію. При цьому одразу перевіряється сумісність – якщо в результаті кросоверу отримано невалідну комбінацію, її можна або відкинути, або виправити (наприклад, заміною несумісного підкомпоненту випадковим сумісним);

2) мутація: до деяких нових конфігурацій застосовуються випадкові незначні зміни, наприклад, один з компонентів замінюється іншим випадковим із того ж класу. Мутація допомагає дослідити простір рішень більш широко і запобігти локальним екстремумам. Її ймовірність зазвичай низька (кілька відсотків);

3) формування нового покоління: із батьківських та нових рішень відбирається наступна популяція фіксованого розміру (наприклад, 50 найкращих конфігурацій з урахуванням як старих, так і новостворених). Генерація за генерацією, середній рівень пристосованості популяції зростає, конфігурації стають дедалі кращими з точки зору критеріїв.

4) критерії зупинки: алгоритм повторює кроки оцінки → відбору → кросоверу/мутації, поки не виконається умова зупинки. Такою умовою може бути досягнення визначеної кількості поколінь, відсутність приросту fitness у найкращих рішень протягом кількох ітерацій або часове обмеження. На практиці генетичний алгоритм здатний за помірне число поколінь знайти дуже наближене до оптимального рішення конфігурації ПК [1];

5) вибір фінальної конфігурації: після завершення еволюційного процесу алгоритм має набір останньої популяції, де конфігурації відсортовані за придатністю. Найкраща конфігурація вилучається як результат оптимізації. Це конкретний набір компонентів, що максимально відповідає вимогам, наприклад, для ігрового ПК за 30000 грн – певний CPU, відповідна материнка, потужна GPU, достатній обсяг ОЗП, тощо, причому сумарна ціна укладається в 30000 грн). В цю конфігурацію вже інтегровані всі компоненти, які користувач забажав залишити: наприклад, старий SSD і БЖ додаються до списку, і система перевіряє, чи вибрані нові частини сумісні з ними;

6. Генерація пояснення та рекомендацій (ChatGPT)

Обрану конфігурацію разом з інформацією про запит (тип використання, бюджет, залишені компоненти) передають у модуль генерації відповіді. На цьому кроці задіюється модель ChatGPT, яка формує розгорнутий рекомендаційний висновок. Задля цього в модель надсилається продуманий промпт: перелік компонентів з назвами, ключовими характеристиками та цінами, а також контекст запиту користувача. ChatGPT аналізує, як ця підібрана система відповідає потребам. Результатом є текст рекомендації, що включає:

1) персоналізоване привітання або звернення до користувача (на кшталт «Виходячи з ваших потреб, оптимальною є така конфігурація...»);

2) перелік нових компонентів, запропонованих до купівлі, із поясненням кожного вибору. Наприклад, «Процесор Intel Core i5-13400F обрано через його високу продуктивність в іграх за розумною ціною, він забезпечить стабільний FPS і не перевищує бюджет»;

3) згадку про залишені компоненти, наприклад, «Ваш існуючий SSD SATA на 500 ГБ буде використано для зберігання даних, що зекономить кошти, а блок живлення 600W достатній для нової конфігурації, тому його теж залишаємо»;

4) загальне обґрунтування відповідності бюджету, наприклад, «Загальна вартість усіх нових компонентів становить ~29800 грн, що не перевищує заданий бюджет»;

5) поради на майбутнє або альтернативи, наприклад, «Якщо ви захочете підвищити продуктивність у майбутньому, ця система підтримує до 64 ГБ ОЗП, тож ви зможете додати модулі пам'яті».

7. Виведення результату користувачу

Сформований текст рекомендації разом зі структурованим списком компонентів повертається через Flask-сервер на фронтенд і відображається користувачу. У підсумковому вигляді користувач бачить запроповану конфігурацію ПК (перелік комплектуючих із зазначенням моделей та цін) і детальний коментар, чому саме ці комплектуючі було обрано і як вони задовольняють його запит. За потреби користувач може відредагувати свої вимоги і запустити цикл підбору знову (наприклад, змінити бюджет або вказати додаткові побажання), оскільки система побудована як інтерактивний конфігуратор.

Таким чином, алгоритм роботи конфігуратора поєднує методи обробки природної мови, евристичний генетичний пошук та генеративні можливості нейромережевої моделі. Кожен етап – від розуміння запиту до оптимізації конфігурації і пояснення результату – забезпечує врахування відповідних аспектів задачі. Завдяки генетичному алгоритму система здатна знайти близькі до оптимальних конфігурації із великого комбінаторного простору варіантів, а використання ChatGPT для генерації пояснень підвищує якість інтерпретації результатів для кінцевого користувача. Це робить розроблену методику ефективним інструментом для підбору комп'ютерних комплектуючих в умовах бюджетних обмежень та наявних апаратних вимог.

Висновки

Самостійна збірка – це спосіб отримати максимально потужний, збалансований та довговічний комп'ютер за мінімальну ціну, а використання онлайн-конфігураторів усуває головний ризик цього процесу – несумісність комплектуючих.

Варто відмітити, що для покращення умінь збирати комп'ютерні системи як навчальні технології пропонуються віртуальна реальність [16] та доповнена реальність [17].

Список використаної літератури

1. Winarno, M. (2018). Design and development of computer specification recommendation system based on user budget with genetic algorithm. *International Journal of New Media Technology*, 5(1), 25–29. <https://doi.org/10.31937/ijnmt.v5i1.814>
2. Mishra, S., Bane, S., Pandit, R., & Phadnis, N. (2021). PC configuration and component recommendation system. *International Journal of Computer Applications*, 183(1), 5–8. <https://doi.org/10.5120/ijca2021921411>
3. Veres, O., Ilchuk, P., & Kots, O. (2023). Information system for analysis of hardware computer components. In *Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324147>
4. Cooler Master. (n.d.). *Power supply calculator*. <https://www.coolermaster.com/en-global/power-supply-calculator/>
5. Ehrgott, M. (2008). Multiobjective optimization. *AI Magazine*, 29(1), 47–57. https://doi.org/10.1007/978-0-387-76635-5_6
6. Березький, О. М., Теслюк, В. М., Дубчак, Л. О., Мельник, Г. М., & Батько, Ю. М. (2022). *Дослідження і проектування комп'ютерних систем та мереж: навчальний посібник*. Тернопіль: ЗУНУ.
7. Rosenberg, R. S. (1970). Stimulation of genetic populations with biochemical properties: I. The model. *Mathematical Biosciences*, 7(3–4), 223–257. [https://doi.org/10.1016/0025-5564\(70\)90126-4](https://doi.org/10.1016/0025-5564(70)90126-4)
8. Rosenberg, R. S. (1970). Simulation of genetic populations with biochemical properties: II. Selection of crossover probabilities. *Mathematical Biosciences*, 8(1–2), 1–37. [https://doi.org/10.1016/0025-5564\(70\)90140-9](https://doi.org/10.1016/0025-5564(70)90140-9)
9. Mitchell, M. (1999). *An introduction to genetic algorithms* (5th printing). Cambridge, MA: MIT Press.
10. Katoch, S., Chauhan, S. S., & Kumar, V. (2021). A review on genetic algorithm: Past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications*, 80(5), 8091–8126. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>
11. Пиріг, Я., Климаш, М., Пиріг, Ю., & Лаврів, О. (2023). Генетичний алгоритм як інструмент для вирішення задач оптимізації. *Інформаційно-комунікаційні технології, електронна інженерія*, 3(2), 95–107. <https://doi.org/10.23939/ict2023.02.095>
12. Wang, Q. J. (1997). Using genetic algorithms to optimise model parameters. *Environmental Modelling & Software*, 12(1), 27–34. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(96\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(96)00030-8)
13. Shevchenko, S., Zhdanova, Y., & Bilous, M. (2025). Automation of class scheduling as a necessary condition for optimization of the functioning of an educational institution. In *Technical, agricultural and mathematical sciences: Scientific trends, problems and ways of their development: Collective monograph* (pp. 296–309). Boston: Primedia eLaunch. <https://doi.org/10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2>

14. Sineglazov, V., Ryazanovskiy, K., & Chumachenko, O. (2020). Multicriteria conditional optimization based on genetic algorithms. *System Research and Information Technologies*, 3(3), 89–104. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2020.3.07>
15. OpenAI. (n.d.). *Introducing ChatGPT*. <https://openai.com/index/chatgpt/>
16. Резніченко, І. В., Негоденко, О. В., & Шевченко, С. М. (2024). Дослідження програмних та технічних засобів для реалізації технології віртуальної реальності. *Зв'язок*, 1(1). <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2024.014147>
17. Westerfield, G., Mitrovic, A., & Billinghamurst, M. (2015). Intelligent augmented reality training for motherboard assembly. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 25(2), 157–172. <https://doi.org/10.1007/s40593-014-0032-x>

References

1. Winarno, M. (2018). Design and development of computer specification recommendation system based on user budget with genetic algorithm. *International Journal of New Media Technology*, 5(1), 25–29. <https://doi.org/10.31937/ijnmt.v5i1.814>
2. Mishra, S., Bane, S., Pandit, R., & Phadnis, N. (2021). PC configuration and component recommendation system. *International Journal of Computer Applications*, 183(1), 5–8. <https://doi.org/10.5120/ijca2021921411>
3. Veres, O., Ilchuk, P., & Kots, O. (2023). Information system for analysis of hardware computer components. In *Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324147>
4. Cooler Master. (n.d.). *Power supply calculator*. <https://www.cooler-master.com/en-global/power-supply-calculator/>
5. Ehr Gott, M. (2008). Multiobjective optimization. *AI Magazine*, 29(1), 47–57. https://doi.org/10.1007/978-0-387-76635-5_6
6. Berezkyi O. M., Tesliuk V. M., Dubchak L. O., Melnyk H. M., & Batko Yu. M. (2022). *Doslidzhennia i proektuvannia kompiuternykh system ta merezh: navchalnyi posibnyk* [Research and design of computer systems and networks: Textbook]. Ternopil: ZUNU.
7. Rosenberg, R. S. (1970). Stimulation of genetic populations with biochemical properties: I. The model. *Mathematical Biosciences*, 7(3–4), 223–257. [https://doi.org/10.1016/0025-5564\(70\)90126-4](https://doi.org/10.1016/0025-5564(70)90126-4)
8. Rosenberg, R. S. (1970). Simulation of genetic populations with biochemical properties: II. Selection of crossover probabilities. *Mathematical Biosciences*, 8(1–2), 1–37. [https://doi.org/10.1016/0025-5564\(70\)90140-9](https://doi.org/10.1016/0025-5564(70)90140-9)
9. Mitchell, M. (1999). *An introduction to genetic algorithms* (5th printing). Cambridge, MA: MIT Press.
10. Katoch, S., Chauhan, S. S., & Kumar, V. (2021). A review on genetic algorithm: Past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications*, 80(5), 8091–8126. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>
11. Pyrih Ya., Klymash M., Pyrih Yu., & Lavriv O. (2023). Henetychnyi alhorytm yak instrument dlia vyrishennia zadach optymizatsii [Genetic algorithm as a tool for solving optimization problems]. *Information and Communication Technologies, Electronic Engineering*, 3(2), 95–107. <https://doi.org/10.23939/ict2023.02.095>
12. Wang, Q. J. (1997). Using genetic algorithms to optimise model parameters. *Environmental Modelling & Software*, 12(1), 27–34. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(96\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(96)00030-8)
13. Shevchenko, S., Zhdanova, Y., & Bilous, M. (2025). Automation of class scheduling as a necessary condition for optimization of the functioning of an educational institution. In *Technical, agricultural and mathematical sciences: Scientific trends, problems and ways of their development: Collective monograph* (pp. 296–309). Boston: Primedia eLaunch. <https://doi.org/10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2>
14. Sineglazov, V., Ryazanovskiy, K., & Chumachenko, O. (2020). Multicriteria conditional optimization based on genetic algorithms. *System Research and Information Technologies*, 3(3), 89–104. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2020.3.07>
15. OpenAI. (n.d.). *Introducing ChatGPT*. <https://openai.com/index/chatgpt/>
16. Reznichenko I. V., Nehodenko O. V., & Shevchenko S. M. (2024). Doslidzhennia prohramnykh ta tekhnichnykh zasobiv dlia realizatsii tekhnolohii virtualnoi realnosti [Research of software and hardware tools for the implementation of virtual reality technology]. *Zv'язok* 1(1), 41–47. <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2024.014147>
17. Westerfield, G., Mitrovic, A., & Billinghamurst, M. (2015). Intelligent augmented reality training for motherboard assembly. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 25(2), 157–172. <https://doi.org/10.1007/s40593-014-0032-x>

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 23.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

УДК 005.8:339.9(100)

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.2.24>

Д. Т. БІКУЛОВ

доктор наук з державного управління,
професор кафедри бізнес-адміністрування
і менеджменту зовнішньоекономічної діяльності
Запорізький національний університет
ORCID: 0000-0001-9188-7310

О. С. ВЕРІТОВА

кандидат педагогічних наук,
старший викладач кафедри бізнес-адміністрування
і менеджменту зовнішньоекономічної діяльності
Запорізький національний університет
ORCID: 0009-0003-1672-0176

**ІСТОРІЯ МЕНЕДЖМЕНТУ У КОНТЕКСТІ РОЗБУДОВИ ІНФРАСТРУКТУРИ
МІЖНАРОДНОГО БІЗНЕСУ**

У цій статті розглянуто історичну еволюцію теорії та практики менеджменту в контексті розвитку ділової інфраструктури від елементарних форм господарського управління надлишками продуктів у стародавніх цивілізаціях до сучасних глобальних систем управління підприємствами, які побудовані на системній цифровій основі. Проаналізовано основні часові етапи становлення філософської та управлінської думки: класичний, неокласичний, поведінковий, системний та сучасний, а також показано їхній взаємозв'язок із змінами в інфраструктурі бізнесу та у характері економічних зв'язків в різних за масштабами соціальних формаціях. Особливу увагу приділено впливу індустріалізації, серійного та масового виробництва, елементів науково-технічної революції, цифровізації та загальної глобалізації на формування управлінських концепцій, як у науковому, так і у діловому контексті. Зазначено, що розвиток менеджменту завжди був зумовлений двома основними факторами: еволюцією економічних відносин – від суто виробництва і торгівлі до сервісно-інформаційної економіки та інтелектуальним зростанням суспільств появою та систематизацією нових знань, ідентифікацією закономірностей, формулюванням правил гри у базовому просторі існування суспільства.

Визначено, що сучасний менеджмент виступає не лише інструментом ефективного функціонування організації підприємства, а й механізмом закономірності розвитку економічних систем, але й визначити перспективні напрями вдосконалення управлінських практик у період глобальної невизначеності адаптації бізнесу до турбулентних змін ринку, інтеграції у міжнародні ланцюги створення вартості та побудови стійких організаційних моделей.

Підкреслено дидактичну важливість історичного підходу до вивчення менеджменту для розуміння сучасних викликів економіки України, зокрема трансформації ринку в умовах війни та післявоєнного відновлення. Розкрито, що осмислення історії управління дозволяє не лише оцінити закономірності розвитку економічних систем, але й визначити перспективні напрями вдосконалення управлінських практик у період глобальної невизначеності.

Ключові слова: менеджмент, ринкові відносини, інфраструктура, міжнародний бізнес, еволюція, управління, індустріалізація, глобалізація, історія економіки, ефективність.

D. T. BIKULOV

Doctor of Public Administration,
Professor at the Department of Business Administration
and Foreign Trade Activity
Zaporizhzhia National University
ORCID: 0000-0001-9188-7310

O. S. VERITOVA

PhD in Pedagogical Science,

Senior Lecturer at the Department of Business Administration

and Foreign Trade Activity

Zaporizhzhia National University

ORCID: 0009-0003-1672-0176

HISTORY OF MANAGEMENT IN THE CONTEXT OF THE INTERNATIONAL BUSINESS RECONSTRUCTION

This article examines the historical evolution of management theory and practice in the context of the development of business infrastructure from elementary forms of economic management of surplus products in ancient civilizations to modern global enterprise management systems built on a systemic digital basis. The main time stages of the formation of philosophical and managerial thought are analyzed: classical, neoclassical, behavioral, systemic and modern, and their relationship with changes in the business infrastructure and the nature of economic relations in social formations of different scales is also shown. Particular attention is paid to the influence of industrialization, serial and mass production, elements of the scientific and technological revolution, digitalization and general globalization on the formation of management concepts, both in the scientific and business context. It is noted that the development of management has always been determined by two main factors: the evolution of economic relations – from purely production and trade to the service-information economy and the intellectual growth of societies through the emergence and systematization of new knowledge, identification of patterns, formulation of the rules of the game in the basic space of the existence of society.

It is determined that modern management is not only a tool for the effective functioning of the enterprise organization, but also a mechanism for the regularity of the development of economic systems, but also to identify promising areas for improving management practices in a period of global uncertainty, business adaptation to turbulent market changes, integration into international value chains and the construction of sustainable organizational models.

The didactic importance of the historical approach to the study of management for understanding the modern challenges of the Ukrainian economy, in particular the transformation of the market in conditions of war and post-war recovery, is emphasized. It is revealed that understanding the history of management allows not only to assess the regularities of the development of economic systems, but also to identify promising areas for improving management practices in a period of global uncertainty.

Key words: management, market relations, evolution, administration, industrialization, globalization, history of economy, efficiency.

Постановка проблеми

Еволюція суспільного управління охоплює період від становлення перших держав до сучасної ери цифровізації та віртуальної економіки. У різні історичні епохи змінювались форми власності, способи організації виробництва, структура ринків та уявлення про роль людини в управлінні. Відтак, формування сучасної теорії менеджменту є результатом тривалої еволюції суспільних відносин, що поєднує економічні, соціальні, політичні та культурні чинники.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У науковому дискурсі з менеджменту виділяються ключові напрями досліджень, які стосуються його історичного розвитку, взаємозв'язку з ринковими відносинами та трансформацій під впливом технологій і інституцій.

Групи дослідників умовно поділяються на два підходи до визначення моменту зародження менеджменту. Перший – історико-економічний вважає, що управлінська діяльність виникла одночасно з появою обміну, праці та первинних ринкових відносин, тобто ще у «догрошовий» період, коли координація спільної праці вимагала елементарних форм організації.

Другий підхід – індустріально-технологічний – ототожнює початок формування менеджменту з періодом промислової революції XVIII–XIX століть, коли виникла потреба в системному управлінні підприємствами, що здійснювали серійне та масове виробництво.

Також сучасні дослідження в галузі цифрової економіки, платформеного бізнесу, ресурсно-здібнісного підходу та мережевих структур (наприклад, роботи Thomas Davenport, Erik Brynjolfsson) підкреслюють зміну ролі менеджменту в контексті глобалізації, автоматизації й перевизначення ринкових відносин [2].

В українському контексті актуальними є праці з менеджменту організацій, стратегічного управління, логістики та цифрової трансформації. Наприклад, в роботах О. Кузьміна, Л. Федулової, В. Гриньової аналізується розвиток українських організацій в умовах трансформуючої економіки, вплив інституцій на управлінські практики та адаптацію до змін ринкових умов [2].

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є синхронізація наукових думок щодо формування менеджменту, як форми соціального управління та, згодом відповідного наукового напрямку з історією суспільного розвитку.

Викладення основного матеріалу дослідження

Сучасна наука менеджменту розглядає управління як складну соціально-економічну систему, яка поєднує організаційні структури, технології прийняття рішень та людський фактор. В умовах глобалізації та переходу до цифрової економіки історичний аналіз еволюції менеджменту набуває особливої актуальності, адже дозволяє простежити закономірності становлення управлінських ідей, зрозуміти їхню спадковість та адаптацію до нових соціально-економічних реалій.

По-перше, ранній напрямок аналізу менеджменту представлений роботами Ф. Тейлора (Frederick Winslow Taylor), зокрема монографією *The Principles of Scientific Management* (1911), у якій він обґрунтував підхід до управління на засадах аналізу роботи, стандартизації, чіткого поділу функцій праці та планування [1]. Цей напрямок зазвичай асоціюється з індустріальною фазою розвитку управління та більш жорсткою формою координації праці.

По-друге, класичний і адміністративний підходи представили такі вчені, як Henri Fayol та Max Weber, які заклали функціональні та бюрократичні моделі організації [3]. Хоча безпосередніх джерел тут не наведено, їхні ідеї широко цитуються в історії менеджменту.

По-третє, роботи бізнес-історика Alfred D. Chandler Jr., зокрема *The Visible Hand: The Managerial Revolution in American Business* (1977), висвітлюють, як управлінська ієрархія, багатозаводські корпорації та адміністративна координація замінили «невидиму руку» ринку в модерній економіці. Chandler акцентує на тому, що великі підприємства посіли центральну роль у структурі американської економіки завдяки розвитку менеджменту.

Узагальнюючи, можна сказати, що різні дослідники, які відносять початок менеджменту до різних форм координації праці, та ті, хто акцентує на його зародженні з промисловою революцією, не є взаємовиключними, а є доповнювальними. Вони допомагають краще зрозуміти, як змінювався менеджмент разом із трансформаціями ринку – від локальних ремісничих виробництв до глобальних платформ і мереж.

Звертаючись до філософської думки розумієш, що філософи та вчені давних часів "обслуговували" суспільство з точки зору виправдання абсолютної зумовленості публічної влади. В їх трактатах фігурують поняття "влада", "правитель" і т.д., управлінські категорії, засновані на примусі сили та страху.

У подальшому філософська думка еволюціонувала разом із суспільством: від сакралізованих уявлень про «божественне право правителя» до спроб осмислити управління як соціальний феномен, заснований на закономірностях поведінки людини, організації праці й раціональному розподілі ресурсів.

Платон і Аристотель першими спробували описати моделі організації влади, що забезпечують гармонію в суспільстві, хоча поняття менеджменту ще не існувало [4]. Для античної епохи управління мало етико-політичний характер і було тісно пов'язане з філософією державності.

У середньовіччі управлінські підходи відображали феодальну ієрархію: влада трактувалася як «дар згори», а підлеглисть – як природний стан речей. Проте вже у період Ренесансу зароджуються прагматичні принципи управління – Макіавеллі у «Державці» розглядав ефективне правління як систему інструментів впливу, незалежну від моралі [4], що фактично наближало його погляди до сучасних моделей політичного менеджменту.

Подальший розвиток управлінської думки пов'язаний із становленням ринкових відносин і появою промислових підприємств. Епоха промислової революції XVIII–XIX століть перетворила управління з мистецтва керування людьми на системну науку. У цей період формуються основи класичної школи менеджменту (Тейлор, Файоль, Вебер), що базується на принципах раціональності, поділу праці, планування та контролю [6].

Таким чином, результати еволюції управлінської думки демонструють, що сучасний менеджмент є синтезом історичних концепцій влади, організації праці та соціальної взаємодії, який пройшов шлях від філософських ідеалів до цифрових технологій управління.

Еволюція менеджменту як науки та практики управління відображає загальний розвиток людської цивілізації – від інтуїтивного керування племінними спільнотами до високотехнологічних цифрових систем прийняття рішень. Управління як соціальний феномен з'являється разом із необхідністю координувати спільну діяльність, але тривалий час воно не мало наукового характеру й ґрунтувалося на владі, традиції та авторитеті. Менеджмент у сучасному значенні виник лише тоді, коли власність і управління почали розділятися, а ефективність стала вимірюватися економічними показниками.

Як кожен науковий напрям, менеджмент трансформувалася від суто практичної системної діяльності до науки з відповідним понятійно-категоріальним апаратом.

Подальша еволюція менеджменту пройшла низку історичних етапів, кожен з яких відображає зміну соціально-економічних формацій, технологій, соціальних та економічних цінностей.

Загальні характеристики основних етапів розвитку форм соціального управління наведено в таблиці 1.

Таким чином, еволюція менеджменту є відображенням трансформації суспільства – від підпорядкування сили до управління знаннями й цінностями. Сучасний менеджмент виступає не лише інструментом координації процесів, а й механізмом соціального розвитку, що інтегрує економічні, інформаційні та етичні складові.

Таблиця 1

Основні етапи розвитку управлінської думки

Етап розвитку	Хронологічні межі	Ключові характеристики управління	Представники / ідеї	Внесок у розвиток менеджменту
Додержавний (первіснообщинний)	до IV тис. до н.е.	Управління ґрунтується на традиціях, силі, авторитеті старійшин; відсутність економічної диференціації.	–	Формування колективних форм організації праці, зародки лідерства.
Стародавній (цивілізаційний)	IV тис. до н.е. – V ст. н.е.	Централізоване управління державами, арміями, господарствами; адміністративно-командний стиль.	Платон, Аристотель, Конфуцій	Формування уявлень про владу, ієрархію, дисципліну.
Феодално-теократичний	V–XVII ст.	Управління через релігійні догми, підпорядкування волі монарха або церкви.	Макиавеллі, Фома Аквінський	Визначення політичних аспектів управління, поява ідеї ефективності влади.
Прото-індустріальний	XVII–XVIII ст.	Поява підприємництва, розвиток ремесел і мануфактур; господарська раціоналізація.	В. Петті, А. Сміт	Формування економічних основ управління, принципи поділу праці.
Індустріальний (класичний)	XVIII–XIX ст.	Створення фабрично-заводської системи, поява професійного менеджера.	Тейлор, Файоль, Вебер	Становлення наукового менеджменту, принципи раціональності й контролю.
Соціально-поведінковий	XX ст. (30–70-ті рр.)	Орієнтація на людину в системі управління, мотивація, комунікації.	Мейо, Маслоу, Герцберг	Формування концепції «плодських відносин», психологізації менеджменту.
Системно-ситуаційний	1970–1990-ті рр.	Розгляд підприємства як системи, адаптація до середовища, гнучке управління.	Друкер, Ансофф, Чендлер	Розвиток стратегічного мислення та управління змінами.
Цифровий (глобальний)	XXI ст.	Використання ІТ, аналітики даних, штучного інтелекту, ESG-підходів.	Котлер, Хаммер, Сенге	Перехід до цифрового, мережевого та етичного менеджменту.

Паралельно з еволюцією управлінських форм розвивалася й інфраструктура бізнесу, що стала фундаментом міжнародних економічних зв'язків. Формування перших торговельних шляхів і морських маршрутів (Великий шовковий шлях, середземноморська торгівля, караванні мережі Азії та Африки) стимулювало спеціалізацію праці, появу посередників, агентів і торгових компаній – тобто перших організацій із чітким розподілом управлінських функцій.

Справжній прорив у становленні міжнародного менеджменту стався в епоху географічних відкриттів (XV–XVII ст.), коли Іспанія, Португалія, а згодом Британія, Франція та Нідерланди почали активну колоніальну експансію. Відкриття нових ринків та ресурсних баз призвело до появи торгових факторій – зародків майбутніх корпорацій, які діяли за суворими контрактами, мали власні правила обліку, управління та навіть військову охорону.

Британська Ост-Індська компанія, заснована 1600 року, стала першим прикладом транснаціональної корпорації – з багаторівневою системою управління, звітності, дивідендами для акціонерів і суворою дисципліною серед найманих працівників. Вона не лише контролювала торгівлю чаєм, прянощами та текстилем, а й фактично керувала цілими територіями в Азії, поєднуючи державне управління з приватною економічною владою.

У цей період формується доктрина меркантилізму – перша системна економічна теорія, яка визнавала, що багатство держави визначається обсягом золота та срібла. Саме тоді з'являється потреба у плануванні зовнішньоекономічної діяльності, контролі експорту-імпорту, державних монополіях і балансі торговельних потоків. Менеджмент отримує рис стратегічного мислення – орієнтацію на прибуток, накопичення капіталу, контроль витрат і створення ефективних логістичних мереж.

У XVIII–XIX ст. розвиток транспортної інфраструктури (канали, залізниці, морські порти) та банківської системи сприяв становленню сучасних інститутів управління – від страхових компаній до міжнародних банків. З'являються перші біржі, акціонерні товариства, кредитні механізми, які забезпечували мобільність капіталу та прискорювали глобальні економічні зв'язки.

Таким чином, менеджмент колоніальної доби можна розглядати як міст між торгівлею й індустріалізацією, а інфраструктура бізнесу – як передумову появи сучасної корпоративної культури, логістики та міжнародного маркетингу.

Аналіз історичного розвитку управлінської думки свідчить, що справжній менеджмент – у його сучасному розумінні – народився не в палацах і не в монастирях, а в цехах, на фабриках і заводах епохи промислової революції.

Саме тоді, коли парові двигуни загудли, коли з'явилися тисячі робітників і десятки видів продукції, людство вперше усвідомило, що без системного управління навіть найпотужніша машина перетворюється на купу заліза.

Менеджмент виник як відповідь на хаос зростаючого виробництва, коли інженер уже не міг одночасно керувати процесом плавлення металу, оформлювати кредити в банку та сваритися з постачальниками вугілля. Відбулося історичне розділення функцій: технічне управління (виробництво) і економічне управління (планування, фінанси, персонал, збут). Звідси почалася нова ера – ера професійних менеджерів, людей, які не створюють речі, а керують тими, хто їх створює.

Суспільство водночас змінило очікування: споживач перестав бути “прохачем” і став клієнтом, який вимагає – якісно, вчасно, за стандартом. Цей переворот у ментальності зумовив появу систем контролю якості, логістики, маркетингу та стандартизації виробництва, що фактично заклали підвалини сучасних концепцій менеджменту.

Важливу роль відіграло й становлення фінансових інститутів, кредитних ліній, бірж і акціонерних товариств, що перетворили управління на інтелектуальний вид діяльності, де рішення приймаються не “на око”, а на основі даних, аналітики та прогнозів. Від ручного керування ми перейшли до управління через системи, структури та людей – до науки, що поєднує економіку, психологію, право та технології.

Висновки

Еволюція менеджменту – це шлях від інстинкту влади до науки про ефективність, від ручного нагляду до цифрового моніторингу, від авторитарного примусу до культури партнерства й корпоративної відповідальності. І якщо колись головним питанням було “як змусити працювати?”, то сьогодні – “як мотивувати, залучити й утримати?”.

Менеджмент більше не є лише інструментом керування – це механізм цивілізаційного розвитку, що формує не лише економіку, а й культуру співпраці, стандарти мислення та глобальні зв'язки.

Список використаної літератури

1. Файоль А. Загальне і промислове управління. Київ : КНЕУ, 2002. 312 с.
2. Вебер М. Протестантська етика і дух капіталізму. Київ : Основи, 2000. 285 с.
3. Друкер П. Ф. Практика менеджменту. Київ : Українська асоціація менеджменту, 2001. 428 с.
4. Chandler, A. D. The Visible Hand: The Managerial Revolution in American Business. Cambridge: Belknap Press. 1977. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1n6z9x>
5. Кузьмін О. Є., Мельник О. Г. Менеджмент організацій : підручник. Львів : Новий світ-2000, 2014. 484 с.
6. Федулова Л. І. Інноваційна економіка та управління знаннями. Київ : КНЕУ, 2015. 376 с.
7. Гріньова В. М., Завадський Ю. С. Менеджмент організацій : теорія та практика. Харків : ІНЖЕК, 2013. 412 с.
8. Brynjolfsson E., McAfee A. The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies. New York : W. W. Norton & Company, 2014. DOI: 10.1007/s11575-015-0254-4.
9. Портер М. Е. Конкурентна перевага: як досягати вищих результатів. Київ : Наш формат, 2019. 592 с.
10. Senge, P. The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization. New York: Currency Doubleday. 1990. <https://doi.org/10.1108/eb054349>

References

1. Fayol, H. (2002). General and Industrial Management. Kyiv: KNEU. [in Ukrainian translation].
2. Weber, M. (2000). The Protestant Ethic and the Spirit of Capitalism. Kyiv: Osnovy. [in Ukrainian translation].
3. Drucker, P. F. (2001). The Practice of Management. Kyiv: Ukrainian Management Association. [in Ukrainian translation].
4. Chandler, A. D. (1977). The Visible Hand: The Managerial Revolution in American Business. Cambridge: Belknap Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1n6z9x>
5. Kuzmin, O. Ye., & Melnyk, O. H. (2014). Management of Organizations. Lviv: Novyi Svit-2000. [in Ukrainian].
6. Fedulova, L. I. (2015). Innovative Economy and Knowledge Management. Kyiv: KNEU. [in Ukrainian].
7. Hrynova, V. M., & Zavadskyi, Y. S. (2013). Management of Organizations: Theory and Practice. Kharkiv: INZHEK. [in Ukrainian].
8. Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies. New York: W. W. Norton & Company. <https://doi.org/10.1007/s11575-015-0254-4>
9. Porter, M. E. (2019). Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance. Kyiv: Nash Format. [in Ukrainian translation].
10. Senge, P. (1990). The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization. New York: Currency Doubleday. <https://doi.org/10.1108/eb054349>

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

В. В. ЄВТУШЕНКОкандидат технічних наук, доцент
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-8720-5804**О. В. ЧЕПЕЛЮК**доктор технічних наук, професор
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-1677-5137

МІЖНАРОДНА ТОРГІВЛЯ ПРОДУКЦІЄЮ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ: СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ

У статті досліджується сучасний стан та перспективи міжнародної торгівлі продукцією легкої промисловості України в умовах воєнних та глобальних викликів. Акцентовано увагу на ключових тенденціях розвитку галузі, зокрема на зміні структури експорту й імпорту, адаптації виробників до нових ринкових умов та посиленні ролі європейського вектору співпраці. Проаналізовано вплив воєнних дій на функціонування підприємств галузі, включаючи руйнування виробничої інфраструктури, ускладнення логістичних маршрутів, зростання вартості транспортування і міжнародного страхування, а також скорочення попиту на окремих зовнішніх ринках через глобальну економічну нестабільність.

Висвітлено роль українських підприємств, які інтегровані у світові виробничі ланцюги, зокрема через участь у контрактному виробництві. Проаналізовано внесок провідних компаній у формування експортних потоків за основними товарними групами текстильної та швейної промисловості, що дає змогу оцінити рівень конкурентоспроможності галузі. Наведено дані щодо зниження експортних обсягів у 2024 році та паралельного зростання імпорту продукції легкої промисловості, що свідчить про посилення імпортозалежності та наявність структурного дисбалансу. Визначено, що попри кризові явища галузь демонструє достатній потенціал для відновлення завдяки досвіду співпраці з ЄС, кваліфікованій робочій силі та розвитку цифрових інструментів, які відкривають нові можливості для малих і середніх виробників.

Узагальнюючи результати, підкреслено потребу у формуванні комплексної стратегії підтримки легкої промисловості України, яка має включати модернізацію виробничих потужностей, упровадження екологічно сталих технологій, підвищення відповідності міжнародним стандартам і посилення державної підтримки експорту. Визначено ключові бар'єри та можливості для подальшого зростання зовнішньоторговельного потенціалу галузі, запропоновано рекомендації щодо зміцнення її конкурентоспроможності у глобальному економічному просторі.

Ключові слова: міжнародна торгівля, продукція, легка промисловість, експорт, імпорт.

V. V. YEVTUSHENKOCandidate of Technical Sciences, Associate Professor
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-8720-5804**O. V. CHEPELYUK**Doctor of Technical Sciences, Professor
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-1677-5137

INTERNATIONAL TRADE IN LIGHT INDUSTRY PRODUCTS: CURRENT STATUS AND PROSPECTS

The article examines the current state and prospects of international trade in light industry products of Ukraine in the context of military and global challenges. Attention is focused on key trends in the development of the industry, in particular on changes in the structure of exports and imports, the adaptation of manufacturers to new market conditions, and the strengthening of the role of European cooperation. The impact of military actions on the functioning of enterprises in the industry is analyzed, including the destruction of production infrastructure, complications in logistics routes,

increased transportation and international insurance costs, and reduced demand in certain foreign markets due to global economic instability.

The role of Ukrainian enterprises integrated into global production chains, in particular through participation in contract manufacturing, is highlighted. The contribution of leading companies to the formation of export flows for the main product groups of the textile and clothing industry is analyzed, which makes it possible to assess the competitiveness of the industry. Data on the decline in export volumes in 2024 and the parallel growth in imports of light industry products are presented, indicating an increase in import dependence and the presence of structural imbalances. It has been determined that despite the crisis, the industry has sufficient potential for recovery thanks to its experience of cooperation with the EU, skilled workforce, and the development of digital tools that open up new opportunities for small and medium-sized manufacturers.

Summarizing the results, the need to develop a comprehensive strategy to support Ukraine's light industry has been emphasized, which should include the modernization of production facilities, the introduction of environmentally sustainable technologies, increased compliance with international standards, and stronger state support for exports. Key barriers and opportunities for further growth of the industry's foreign trade potential were identified, and recommendations were made to strengthen its competitiveness in the global economic space.

Key words: international trade, products, light industry, exports, imports.

Постановка проблеми

Легка промисловість України, маючи значний досвід виробництва та усталені зв'язки з європейськими партнерами, опинилася в умовах суттєвих викликів, спричинених воєнними діями, руйнуванням виробничих потужностей, порушенням логістики та зростанням зовнішніх технічних бар'єрів. Попри збереження експортної активності та інтеграцію українських підприємств у світові виробничі ланцюги, галузь демонструє падіння обсягів торгівлі, підвищену імпортозалежність і недостатній рівень технологічної модернізації. Ускладнений доступ на ринок ЄС через посилення екологічних та технічних вимог, зниження попиту на окремих зовнішніх ринках, а також потреба у переході до сталих виробничих моделей формують комплекс проблем, що стримують розвиток галузі. За таких умов виникає необхідність ґрунтовного аналізу сучасного стану міжнародної торгівлі продукцією легкої промисловості України, виявлення ключових бар'єрів та визначення напрямів підвищення її конкурентоспроможності в умовах глобальних та внутрішніх трансформацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Війна послабила експортні можливості української текстильної та швейної промисловості через руйнування виробництв і розрив ланцюгів поставок, однак поглиблення співпраці з ЄС відкриває нові перспективи на зовнішніх ринках. Для відновлення конкурентних позицій у міжнародній торгівлі галузі необхідно модернізувати виробництво та відповідати європейським стандартам [1]. Проаналізовано динаміку торгівлі текстилем між Україною та ЄС у період 2014–2023 років, акцентуючи увагу на необхідності переходу до сталих виробничих підходів для підвищення конкурентоспроможності українських виробників [2]. Впровадження в ЄС жорстких технічних регламентів щодо походження текстильних матеріалів, безпечності виробництва та контролю хімічних речовин створює суттєві технічні бар'єри для українських виробників і обмежує їхні можливості експорту на європейський ринок [3]. Дослідження показують, що для відновлення конкурентоспроможності української легкої промисловості необхідні модернізація виробництва, перехід до сталих практик та відповідність технічним регламентам ЄС. Однак, доцільним є проведення **більш комплексного, аналітичного та практично орієнтованого підходу**, який спрямований на всебічне розуміння стану всієї галузі легкої промисловості.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є аналіз сучасного стану міжнародної торгівлі продукцією легкої промисловості України, визначення основних проблем і викликів галузі та розробка рекомендацій щодо підвищення її конкурентоспроможності.

Викладення основного матеріалу дослідження

Міжнародна торгівля продукцією легкої промисловості має низку специфічних особливостей, які визначають структуру та динаміку світових товарних потоків. Галузь є однією з найбільш глобалізованих, оскільки виробництво текстилю, одягу й взуття часто розподілене між різними країнами, що формує складні ланцюги доданої вартості: одні держави виготовляють сировину та тканини, інші здійснюють пошиття, а розвинені країни забезпечують брендування та збут. Висока трудомісткість виробництва зумовлює концентрацію основних виробничих потужностей у державах із дешевою робочою силою, тоді як країни ЄС, США та Японія залишаються найбільшими імпортерами та споживачами. Галузь характеризується швидкою змінюваністю моди та короткими життєвими циклами продукції, що підсилює конкуренцію та вимагає гнучкої адаптації виробників до нових трендів. Водночас міжнародна торгівля продукцією легкої промисловості є вразливою до логістичних, політичних та економічних ризиків, які особливо загострилися після пандемії та в умовах воєнних конфліктів. Значну роль у торгівлі відіграють стандарти якості, екологічні вимоги та сертифікація, що особливо важливо для доступу на ринок

ЄС. Поширеним є контрактне виробництво (Cut – Make – Trim, Free on Board, Original Equipment Manufacturer), яке дозволяє країнам із розвиненим виробництвом працювати на іноземні бренди [4].

Цифрові технології та електронна комерція стають окремим важливим трендом, який трансформує форми міжнародної співпраці та дає змогу малим виробникам активніше виходити на світові ринки. Одночасно з цим посилюється увага до екологічності та принципів сталого розвитку: як споживачі, так і державні органи дедалі частіше вимагають відкритості ланцюгів постачання та застосування безпечних, екологічно чистих матеріалів.

Для України міжнародна торгівля продукцією легкої промисловості має свої специфічні умови: близькість до ринку ЄС, значний досвід контрактного виробництва, кваліфікована робоча сила та водночас – логістичні труднощі й виклики, пов'язані з воєнним станом. Попри це, українські підприємства зберігають конкурентоспроможність і продовжують інтегруватися у світові виробничі ланцюги.

Воєнний стан та пов'язані з ним економічні й логістичні обмеження стали серйозним викликом для української легкої промисловості. Проте, незважаючи на зовнішні та внутрішні ризики, галузь продовжує відігравати помітну роль у формуванні експортного потенціалу країни. Динаміка виробництва, зміни у структурі імпортно-експортних потоків і адаптивність підприємств до нових реалій свідчать як про наявні проблеми, так і про можливість подальшого розвитку.

Важливий внесок у підтримання експортного потенціалу роблять підприємства, які входять до Асоціації «Укрлегпром». Їх присутність серед експортерів у різних товарних категоріях підтверджує глибоку інтеграцію у світові виробничі ланцюги та високу конкурентоспроможність продукції на міжнародному ринку.

Зокрема, виробники трикотажного одягу забезпечили понад **76%** експорту групи 61 (за українським класифікатором зовнішньоекономічної діяльності – УКТ ЗЕД) – одяг та додаткові речі до одягу, трикотажні; підприємства, що спеціалізуються на текстильному одязі (група 62 – одяг та додаткові речі до одягу, текстильні, окрім трикотажних), сформували понад **56%** загального експорту; у групі 63 (готові текстильні вироби) компаній забезпечили **83%** вивезення продукції; виробники взуття зберегли свої позиції у нішевих сегментах, попри загальне падіння світового попиту [5].

Хоча експорт зберігся, у 2024 році міжнародна торгівля продукцією легкої промисловості загалом продемонструвала спад. Обсяги вивезення товарів цієї галузі зменшилися на 10,5%, що зумовлено низкою зовнішніх та внутрішніх чинників:

- ускладненою логістикою через блокування традиційних транспортних маршрутів;
- зростанням вартості міжнародного страхування та доставки;
- зниженням попиту на деяких зовнішніх ринках через глобальну економічну нестабільність.

Незважаючи на це, українські підприємства змогли утримати ключові позиції у виробництві трикотажного та текстильного одягу. Значна частка експорту припадає на **провідні підприємства легкої промисловості**, які завдяки масштабності виробництва та сталій співпраці з іноземними партнерами забезпечують понад половину загального експорту кожної товарної групи.

Характерним явищем 2024 року стало також **зростання імпорту продукції легкої промисловості**, який досяг 1,6 млрд. дол. США. Незначне, але помітне збільшення імпортних поставок свідчить про підвищений попит на зовнішні товари, що зумовлено зміною споживчої поведінки населення та обмеженими виробничими можливостями частини підприємств через війну [5].

За підсумками 2024 року експорт продукції легкої промисловості, а саме, текстильні матеріали та текстильні вироби (розділ XI УКТ ЗЕД) становив 610928, 3 тис. дол. США, що становило 1,5% від загального експорту; імпорт – 2399044,9 тис. дол. США відповідно 3,44% від загального обсягу імпорту. У сегменті продукції – взуття, головні убори, парасольки (розділ XII УКТ ЗЕД) експорт становив 145120,4 тис. дол. США, що становило 0,3% від загального експорту; імпорт – 468654,2 тис. дол. США відповідно 0,7% від загального обсягу імпорту (рис. 1) [6].

Показники 2024 року демонструють, що легка промисловість України, попри присутність на світових ринках, залишається імпортозалежною та потребує активних заходів для посилення конкурентоспроможності й розширення експортного потенціалу.

Висновки

Легка промисловість України зберігає присутність на світовому ринку, хоча обсяги експорту у 2024р. скоротилися на 10,5%. Разом із тим, галузь залишається залежною від імпорту, оскільки його обсяги значно перевищують експорт, що підкреслює необхідність модернізації виробничих потужностей. Галузь стикається із підвищеними ризиками через логістичні складнощі, економічну нестабільність та вплив війни, проте цифрові технології та контрактне виробництво дозволяють підтримувати її стійкість. Важливе значення для виходу продукції на європейські ринки мають стандарти якості та екологічні вимоги.

Щоб зменшити імпортозалежність української легкої промисловості, необхідно модернізувати виробництво шляхом впровадження сучасного обладнання та автоматизації, розвивати власне виробництво сировини та матеріалів, а також диверсифікувати постачальників для зменшення залежності від окремих країн.

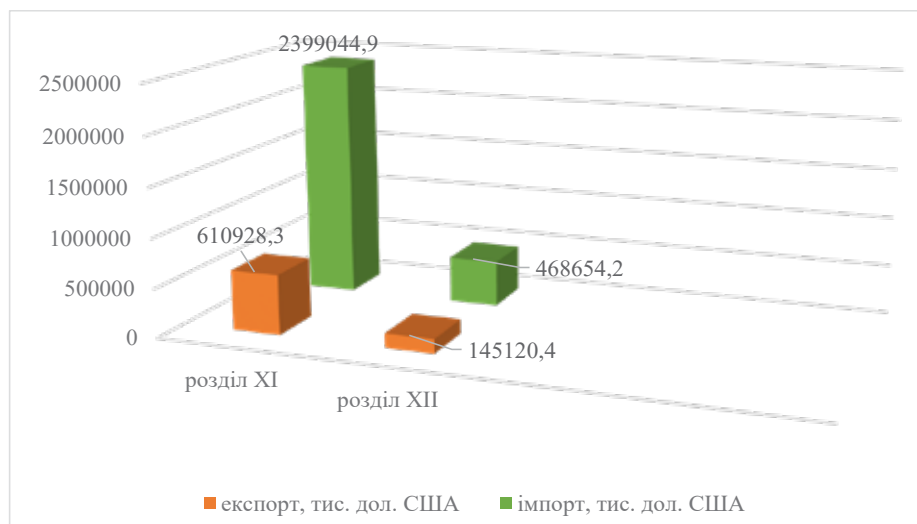


Рис. 1. Товарна структура міжнародної торгівлі продукцією легкої промисловості, тис. дол. США

Необхідно впроваджувати інновації та використовувати альтернативні матеріали, зокрема перероблені та екологічні, а також модернізувати виробництво. За умов стабілізації логістичних шляхів і державної підтримки українська легка промисловість здатна відновити і зміцнити свої позиції на глобальному ринку.

Список використаної літератури

1. Dobos E. Ukrainian Textile and Garment Industry: Navigating War and EU Integration. *Köz-gazdaság*. 2025. Vol.20, no.3 – Special Issue. P.122. URL: <https://doi.org/10.14267/retp2025.03.07>
2. Беженар І. Маркетингові стратегії для розвитку українського виноробства. *Acta Academiae Beregsasiensis. Economics*. 2025. № 10. С. 16–39. URL: <https://doi.org/10.58423/2786-6742/2025-10-16-39>
3. Оцінювання відповідності текстилю українського виробництва / О. Калашник та ін. *Development Service Industry Management*. 2024. № 2. С. 65–69. URL: [https://doi.org/10.31891/dsim-2024-6\(10\)](https://doi.org/10.31891/dsim-2024-6(10))
4. Andreiev O. V., Duginets G. V. Contract Manufacturing as a Factor in Enforcing Post-War Recovery Processes in the Economics of Ukraine. *Business Inform*. 2023. Vol. 10, no. 549. P. 191–196. URL: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2023-10-191-196>
5. Лідери експорту товарів легкої промисловості у 2024 році – Укрлегпром. *Укрлегпром*. URL: <https://ukrlegprom.org/ua/news/lidery-eksportu-tovariv-legkoyi-promyslovosti-u-2024-roczii/>
6. Зовнішня торгівля 2024: Топ-5 позицій експорту та імпорту. *Скільки-скільки?* URL: <https://skilky-skilky.info/zovnishnia-torhivlia-ukrainy-u-2024-rotsi-top-5-pozytsiy-eksportu-ta-importu/>

References

1. Dobos, E. (2025b). Ukrainian Textile and Garment Industry: Navigating War and EU Integration. *Köz-gazdaság*, 20(3 – Special Issue), 122. <https://doi.org/10.14267/retp2025.03.07>
2. Беженар, І. (2025а). Маркетингові стратегії для розвитку українського виноробства. *Acta Academiae Beregsasiensis. Economics*, (10), 16–39. <https://doi.org/10.58423/2786-6742/2025-10-16-39>
3. KALASHNYK, O., MOROZ, S., TARAN-LALA, O., & KYRYCHENKO, O. (2024a). OTsINIUVANNIA VIDPOVIDNOSTI TEKSTYLIU UKRAINSKOHO VYROBNYTSTVA. *Development Service Industry Management*, (2), 65–69. [https://doi.org/10.31891/dsim-2024-6\(10\)](https://doi.org/10.31891/dsim-2024-6(10))
4. Andreiev, O. V., & Duginets, G. V. (2023a). Contract Manufacturing as a Factor in Enforcing Post-War Recovery Processes in the Economics of Ukraine. *Business Inform*, 10(549), 191–196. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2023-10-191-196>
5. Lidery eksportu tovariv lehkoj promyslovosti u 2024 rotsi – Ukrlehprom. (b. d.-a). Ukrlehprom. <https://ukrlegprom.org/ua/news/lidery-eksportu-tovariv-legkoyi-promyslovosti-u-2024-roczii/>
6. Zovnishnia torhivlia 2024: Top-5 pozytsii eksportu ta importu. (b. d.-b). Skilky-skilky? <https://skilky-skilky.info/zovnishnia-torhivlia-ukrainy-u-2024-rotsi-top-5-pozytsiy-eksportu-ta-importu/>

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.11.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025
 Дата публікації: 31.12.2025

О. В. КОКОРЕВА

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри менеджменту, маркетингу і туризму
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-9918-2278

А. О. ОСАДЧА

здобувачка кафедри менеджменту, маркетингу і туризму
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0002-8060-1916

ПОЗИТИВНИЙ ВПЛИВ ESG-РЕЙТИНГІВ НА ЗНИЖЕННЯ ВАРТОСТІ КАПІТАЛУ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Стаття присвячена комплексному дослідженню механізмів впливу ESG-рейтингів як ключового нефінансового індикатора на формування структури та вартості капіталу промислових підприємств в умовах глобальної економічної трансформації. В роботі детально розглянуто процес інтеграції екологічних, соціальних та управлінських критеріїв у традиційні моделі оцінки фінансових активів, що змінює підходи міжнародних інвесторів до визначення премії за ризик. Проведено системний аналіз та синтез результатів сучасних емпіричних досліджень міжнародних ринків капіталу, що підтверджує трансформацію ESG-факторів з категорії етичних зобов'язань у площину прагматичного управління довгостроковими фінансовими ризиками.

Методологія дослідження базується на структурній декомпозиції середньозваженої вартості капіталу та виокремленні специфічних каналів трансляції ESG-ризиків на її складові. Описано механізм оптимізації вартості боргового фінансування, який реалізується через зниження інформаційної асиметрії між позичальником і кредитором, зменшення репутаційних ризиків банківських установ та забезпечення ефекту «страхування» від дефолту для компаній зі значним операційним та фінансовим левериджем. Особливу увагу приділено моделюванню вартості акціонерного капіталу, де високі ESG-стандарты сприяють зниженню систематичного ризику та підвищенню ринкової ліквідності акцій завдяки доступу до інвестиційних мандатів глобальних відповідальних фондів.

Результати узагальнення емпіричних даних демонструють вимірюваний фінансовий ефект від впровадження ESG-стратегій: встановлено потенціал зниження вартості залучення боргового капіталу в діапазоні 5–20 базисних пунктів та зменшення вартості власного капіталу на 0,50%–1,00%. Ці показники кількісно підтверджують наявність ринкового ефекту «грінїуму» та свідчать про те, що активне управління ESG-профілем є критично важливою умовою для забезпечення доступу до дешевого довгострокового фінансування, необхідного для технологічної модернізації та збереження конкурентоспроможності промислового бізнесу.

Ключові слова: ESG-рейтинги, вартість капіталу, промислові підприємства, фінансові ризики, інформаційна асиметрія.

O. V. KOKORIEVA

PhD in Economics, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Management, Marketing and Tourism
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-9918-2278

A. O. OSADCHA

Student at the Department of Management, Marketing and and Tourism
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0002-8060-1916

INFLUENCE OF ESG RATINGS ON THE COST OF CAPITAL OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

The article presents a comprehensive study on the mechanisms through which ESG ratings, acting as a key non-financial indicator, influence the formation of capital structure and the cost of capital for industrial enterprises amidst global economic transformation. The paper examines in detail the process of integrating environmental, social,

and governance criteria into traditional financial asset valuation models, which is shifting international investors' approaches to determining risk premia. A systematic analysis and synthesis of contemporary empirical research results from international capital markets confirm the transformation of ESG factors from ethical obligations into the realm of pragmatic long-term financial risk management.

The research methodology is based on the structural decomposition of the Weighted Average Cost of Capital and the isolation of specific transmission channels through which ESG risks affect its components. The mechanism for optimizing the cost of debt financing is described, which is realized through mitigating information asymmetry between the borrower and the lender; reducing the reputational risks of banking institutions, and providing an «insurance» effect against default for companies with significant operating and financial leverage. Particular attention is given to modeling the cost of equity capital, demonstrating how high ESG standards contribute to lowering systematic risk and increasing stock market liquidity through access to the investment mandates of global responsible funds.

The results of summarizing empirical data demonstrate a measurable financial effect from implementing ESG strategies: a potential reduction in the cost of raising debt capital in the range of 5–20 basis points and a decrease in the cost of equity capital by 0.50%–1.00% has been established. These figures quantitatively confirm the existence of the market «Greenium» effect and indicate that active management of the ESG profile is a critically important condition for ensuring access to cheaper long-term financing necessary for the technological modernization and sustained competitiveness of industrial businesses.

Key words: ESG ratings, cost of capital, industrial enterprises, financial risks, information asymmetry.

Постановка проблеми

Безперервне підвищення вимог міжнародних інституційних інвесторів до корпоративної стійкості, а також зростання фінансових ризиків, пов'язаних із соціальними та екологічними чинниками, призводить до суттєвої переоцінки промислових активів на світових ринках. Це зумовлює гостру потребу для сучасних промислових підприємств у пошуку ефективних інструментів інтеграції нефінансових показників для оптимізації структури капіталу та зниження його загальної вартості. У цьому контексті критично важливим стає аналіз ESG-рейтингів як ключового індикатора, що дозволяє інвесторам оцінювати ризики, а менеджменту – стратегічно управляти фінансовою стійкістю та вартістю залучення ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Теоретичні та практичні аспекти впливу нефінансових показників на вартість фінансування бізнесу розглядалися у працях таких дослідників, як Т. Васильєва, Л. Гатри, О. Длугопольський, Дж. Екклз, І. Макаренко, Дж. Серафейм та інших. У їхніх роботах ґрунтовно досліджено методологію ESG-рейтингування, роль нефінансової звітності в інвестиційних процесах та механізми управління ризиками сталого розвитку.

Однак особливості кількісного впливу ESG-балів безпосередньо на вартість залучення капіталу в умовах глобальної економічної трансформації залишаються недостатньо вивченими. Незважаючи на значний внесок науковців, необхідність у подальших дослідженнях пов'язана з потребою визначення чіткої кореляції між високими ESG-рейтингами та зниженням вартості фінансових ресурсів для масштабування бізнес-моделей. Емпіричні дослідження, проведені на базі компаній, підтверджують стійкість цього тренду та надають нові докази впливу ESG-балів на вартість капіталу. Аналіз показує, що інтеграція ESG-факторів має прямий та вимірюваний фінансовий ефект: компанії з високими показниками у цій сфері демонструють здатність залучати капітал за нижчою вартістю порівняно з конкурентами, що мають низькі рейтинги. Сучасні науковці пов'язують цей механізм насамперед зі зниженням інформаційної асиметрії між компанією та ринком капіталу, а також зі зменшенням сприйняття інвесторами систематичних ризиків [5].

Узагальнюючи теоретичні та практичні напрацювання, можна стверджувати, що інтеграція екологічних, соціальних та управлінських критеріїв виступає своєрідним каталізатором, який згуртовує в єдине стратегічне бачення фінансові, організаційні та технологічні інновації сучасного підприємства [1]. Такий підхід дозволяє розглядати високий ESG-рейтинг як потужний сигнал ринку про ефективність корпоративного управління та довгострокову стратегічну передбачливість бізнесу, що безпосередньо впливає на вартість залучення капіталу.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є систематизація та кількісне узагальнення механізмів впливу ESG-рейтингів на складові середньозваженої вартості капіталу промислових підприємств (боргового та власного) для обґрунтування практичних стратегічних рекомендацій щодо управління ESG-профілем як ключовим активом підвищення фінансової ефективності.

Викладення основного матеріалу дослідження

Сучасний розвиток світової економіки характеризується зміщенням акцентів інвесторів від суто фінансових показників до критеріїв сталого розвитку та корпоративної стійкості. В умовах прискореної глобальної економічної трансформації та зростання регуляторних вимог, ESG-рейтинги перетворилися на ключовий нефінансовий індикатор, який використовується для оцінки довгострокових ризиків промислових підприємств. Це явище формує нову парадигму фінансування, де вартість залучення капіталу прямо корелює з рівнем відповідальності

компанії. Концепція ESG на сьогодні стає фундаментом нових стандартів корпоративної відповідальності та стратегії конкурентоспроможності. У своїй суті ESG відображає прагнення забезпечити довгострокову життєздатність бізнесу через управління екологічними ризиками, залучення стейкхолдерів та створення прозорої структури корпоративного управління. Ця система інтегрує три ключові складові: екологічну (E), соціальну (S) та управлінську (G). ESG-рейтинги виступають для міжнародних інвесторів ключовим індикатором фінансової стійкості, оскільки вони дозволяють оцінювати нефінансові ризики, які можуть нівелювати прибуток у довгостроковій перспективі [3]. У науковій літературі існують численні дослідження, присвячені кореляції між високими ESG-показниками та фінансовими результатами компаній, особливо в галузях з високим екологічним впливом. Розуміння глибинного механізму взаємодії цих складових визначає здатність сучасного промислового підприємства трансформувати нефінансові зусилля у фінансовий результат. Візуалізація взаємозв'язків на рисунку 1 представляє розширену концептуальну модель, що ілюструє повний ланцюг трансляції нефінансових ESG-факторів у пряму монетарну вигоду для промислових підприємств.

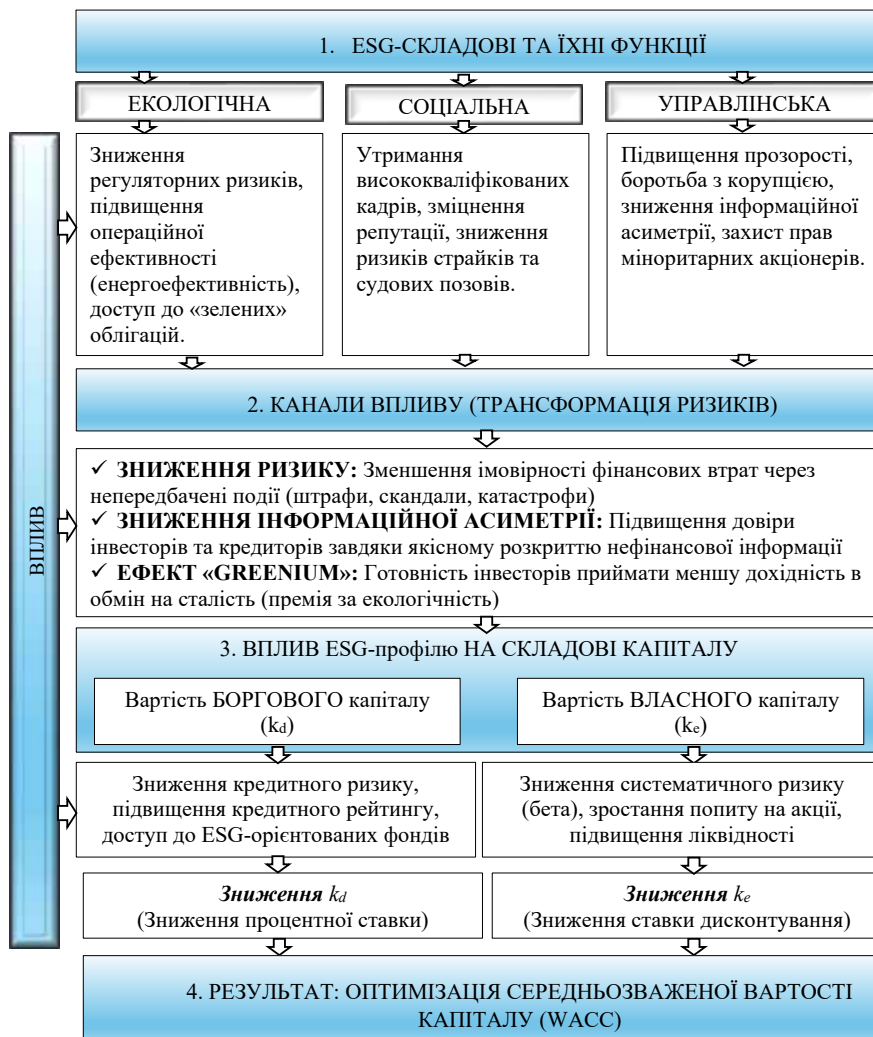


Рис. 1. Концептуальна модель впливу ESG-профілю на середньозважену вартість капіталу (WACC) промислових підприємств

Джерело: власна розробка авторів

Модель складається з чотирьох взаємопов'язаних рівнів:

1. ESG-Складові та їхні функції: На цьому рівні визначено функціональний вплив кожного елемента (Environmental, Social, Governance) на стратегічні переваги компанії, такі як зниження регуляторних ризиків, утримання кадрів та підвищення прозорості.

2. Канали Впливу (Трансформація Ризиків): Визначено три основні механізми, через які стратегічні переваги конвертуються в довіру ринку: зниження загального ризику, зменшення інформаційної асиметрії між емітентом та інвестором, а також формування ефекту «Greenium» (премія за сталість).

3. Вплив на Складові Капіталу: Ці канали прямо впливають на дві ключові складові WACC. Зниження кредитного ризику та доступ до «зеленого» фінансування призводять до зниження вартості боргового капіталу (k_d). Зменшення систематичного ризику та підвищення ліквідності акцій спричиняє зниження вартості власного капіталу (k_e).

4. Кінцевий Фінансовий Результат: Синергетична дія обох механізмів призводить до Оптимізації Середньозваженої Вартості Капіталу (WACC). Зниження WACC, у свою чергу, підвищує чисту теперішню вартість інвестиційних проектів (NPV) та забезпечує довгострокове зростання ринкової вартості підприємства.

Схема підтверджує, що управління ESG-профілем є прагматичним інструментом фінансового менеджменту, а не лише етичним зобов'язанням. Зниження специфічних ризиків, прямо конвертується у підвищення довіри з боку інвесторів та кредиторів. Це стає фундаментом для зниження вартості залученого капіталу та формування довгострокової конкурентної переваги промислового підприємства на глобальному ринку.

Розкриваючи механізм впливу компонентів ESG на фінансову архітектуру, варто насамперед проаналізувати трансформацію вартості боргового капіталу. Сучасна фінансова практика свідчить, що традиційні моделі оцінки вже не здатні охопити весь спектр загроз платоспроможності промислового позичальника, діяльність якого пов'язана зі значним впливом на довкілля та соціальну сферу. Як наслідок, високий ESG-рейтинг виступає критичним інструментом, що знижує премію за ризик у структурі відсоткових ставок через дію трьох взаємопов'язаних механізмів.

Першим та ключовим фактором є зниження інформаційної асиметрії між промисловим підприємством та кредитором. ESG-рейтинг слугує для банку джерелом суттєвої нефінансової інформації, яка доповнює класичний аналіз платоспроможності. Високі показники у цій сфері сигналізують про якість корпоративного управління та прозорість складних виробничих бізнес-процесів. Це зменшує невизначеність щодо майбутнього компанії, дозволяючи кредитору встановити нижчу відсоткову ставку, оскільки позичальник сприймається як більш передбачуваний та надійний.

Другий механізм пов'язаний з управлінням власними репутаційними ризиками фінансових установ. Банки дедалі частіше уникають кредитування екологічно небезпечних промислових об'єктів, щоб захистити власний імідж перед регуляторами та суспільством. У цьому контексті підприємства важкої індустрії, що демонструють високі стандарти ESG, стають пріоритетними клієнтами, отримуючи доступ до «зеленого фінансування» та лояльніших умов кредитування. Натомість компанії з низькими рейтингами стикаються з обмеженням доступу до капіталу, необхідного для модернізації фондів.

Третім важливим фактором є ефект своєрідного «страхування», який є особливо актуальним для капіталомістких промислових компаній зі значним операційним та фінансовим левериджем. Емпіричні дослідження підтверджують, що саме такі підприємства отримують найбільшу фінансову вигоду від впровадження ESG-стратегій. Для них високий рейтинг виступає гарантом довгострокової життєздатності активів, що суттєво полегшує процес рефінансування боргів та знижує ризик дефолту [4].

Втім, оптимізація боргового навантаження становить лише частину фінансової стратегії. Для комплексного розуміння змін у середньозваженій вартості капіталу необхідно також дослідити вплив ESG-факторів на вартість власного капіталу. Саме реакція акціонерів та кореляція нефінансових рейтингів із ринковою волатильністю визначають другу, не менш важливу складову ціни фінансування бізнесу.

На відміну від боргового фінансування, де ефект досягається через пряме зниження відсоткової ставки, вплив ESG на вартість власного капіталу реалізується через корекцію очікуваної дохідності інвесторів. Дослідження ринків, що розвиваються, підтверджують, що акції компаній з високими показниками сталого розвитку демонструють вищу стійкість до ринкових шоків. Зниження вартості акціонерного капіталу є результатом комплексної дії кількох факторів. Насамперед, високий рівень прозорості та ефективне управління нефінансовими ризиками роблять грошові потоки промислової компанії більш прогнозованими. Інвестори сприймають такі активи як менш ризиковані, що дозволяє їм знизити вимогу до мінімальної дохідності в моделях оцінки активів, таких як CAPM.

Крім того, відповідність критеріям ESG відкриває доступ до капіталу глобальних інституційних інвесторів, чий мандат забороняє інвестувати в «брудні» промислові активи. Зростання попиту на акції автоматично підвищує їх ринкову ліквідність та капіталізацію, що фактично здешевлює залучення нового акціонерного капіталу для емітента. Також емпіричні дані свідчать, що впровадження ESG-стратегій позитивно корелює з інноваційним потенціалом підприємства, зокрема з впровадженням енергоефективних технологій. Це підвищує оцінку майбутніх грошових потоків ринком та формує премію за стійкість у ціні акцій [6].

Отже, для промислових підприємств інтеграція ESG-принципів стає механізмом подвійної дії: вона одночасно знижує вартість обслуговування боргів та зменшує тиск з боку акціонерів щодо виплати надвисоких дивідендів, зміщуючи фокус на довгострокове зростання вартості.

Кількісний вимір описаних вище механізмів найкраще простежується через зіставлення результатів емпіричних досліджень, проведених на міжнародних ринках капіталу. Систематизація даних щодо впливу ESG-рейтингів на конкретні елементи середньозваженої вартості капіталу дозволяє сформувати комплексну картину фінансових переваг для промислового сектору (табл. 1).

Таблиця 1

Кількісна оцінка впливу ESG-факторів на складові середньозваженої вартості капіталу (WACC)

Складова капіталу	Механізм впливу	Кількісний ефект
Борговий капітал (Банківські кредити)	Зниження інформаційної асиметрії та кредитного ризику (покращення кредитного рейтингу)	Зниження відсоткової ставки на 5 – 20 б.п.
Борговий капітал (Корпоративні облигації)	Ефект «Greenium» (зеленої премії) та високий попит на сталі фінансові інструменти	Зниження спреду дохідності на 1 – 10 б.п. порівняно з традиційними облигаціями
Власний капітал	Зниження систематичного ризику (бета) та очікуваної дохідності акціонерів	Зниження вартості залучення на 0.50% – 1.00%
Середньозважена вартість капіталу (WACC)	Комплексний ефект оптимізації структури фінансування та зниження ризиків	Загальне здешевлення капіталу на 0.30% – 0.80%

Джерело: сформовано на основі [5] та узагальнення емпіричних даних (власна розробка авторів)

Аналіз наведених даних свідчить, що інтеграція ESG-факторів створює синергетичний ефект для промислових підприємств. Зниження вартості як боргового, так і власного капіталу у сукупності призводить до системного зменшення середньозваженої вартості капіталу. Це підтверджує, що високий ESG-рейтинг трансформується з нефінансового показника у реальний інструмент підвищення інвестиційної привабливості та фінансової ефективності бізнесу.

Висновки

У дослідженні проаналізовано механізм впливу ESG-рейтингів на фінансову архітектуру промислових підприємств. Узагальнення теоретичних засад та емпіричних даних дозволило встановити, що інтеграція принципів сталого розвитку дозволяє суттєво знизити середньозважену вартість капіталу. Систематизовані кількісні дані демонструють наявність чіткого економічного ефекту: високий ESG-рейтинг знижує кредитні ризики, забезпечуючи ефект «грініуму» на ринку боргових зобов'язань, а також зменшує систематичний ризик для акціонерів, що призводить до зниження вартості власного капіталу.

Практична імплементація стратегій сталого розвитку стає критично важливою для промислових підприємств у контексті глобальної конкуренції за ресурси. Враховуючи посилення вимог міжнародних інвесторів та банків, цілеспрямоване управління ESG-профілем перетворюється з етичного вибору на необхідну умову забезпечення доступу до довгострокового та дешевого фінансування, що є фундаментом для технологічної модернізації та збереження ринкових позицій бізнесу.

Отже, результати дослідження дають підстави стверджувати, що ESG-трансформація перестає бути лише іміджевим інструментом. Формування високого рейтингу дозволяє промисловим підприємствам конвертувати нефінансову відповідальність у реальну монетарну вигоду через механізм здешевлення капіталу, перетворюючи ESG-профіль на критично важливий актив у структурі вартості компанії.

Список використаної літератури

1. Маслак, Т. О., & Думич, М. Р. (2025). Formation and application of ESG tools in scaling business models in the context of the green transition. *Scientific Notes of Lviv University of Business and Law*, (46), 213-222. Retrieved from <https://nzlubp.org.ua/index.php/journal/article/view/1788>
2. CSR Marketing. Що таке ESG і чому це важливо для вашого бізнесу [Електронний ресурс]. URL: <https://csr.community/shho-take-esg-i-chomu-cze-vazhlyvo-dlya-vashogo-biznesu/>
3. Офіс Сталих Рішень. Яка різниця між CSR чи ESG і як перетворити соціальну відповідальність та задекларовані цінності на реальну конкурентну перевагу? [Електронний ресурс]. URL: <https://ukraine-oss.com/yaka-riznyczya-mizh-csr-chy-esg-i-yak-peretvoryty-soczialnu-vidpovidalnist-ta-zadeklarovani-czinnosti-na-realnu-konkurentnu-perevagu/>
4. Alves C. F., Meneses L. L. (2024). ESG scores and debt costs: Exploring indebtedness, agency costs, and financial system impact. *International Review of Financial Analysis*. 2024. Vol. 91. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2024.103240>
5. Fan Y., Liu C., Xia X. (2024). The Impact of ESG Performance on Corporate Financialization: Evidence from Chinese Listed Companies. *Finance Research Letters*. 2024. Vol. 62. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.62517/jbm.202509108>
6. Yin X.-N., Li J.-P., Su C.-W. (2023). How does ESG performance affect stock returns? Empirical evidence from listed companies in China. *Heliyon*. 2023. Vol. 9. P. 1-12. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16320>

References

1. Maslak, T. O., & Dumych, M. R. (2025). Formuvannia ta zastosuvannia ESG-instrumentiv u protsesi masshtabuvannia biznes-modelei u konteksti zelenoho perekhodu [Formation and application of ESG instruments in the process of scaling business models in the context of green transition]. *Naukovi zapysky Lvivskoho universytetu biznesu ta prava. Seriiia ekonomichna. Seriiia yurydychna*, 46/2025, 213–220. Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17541842>

2. CSR Marketing. (n.d.). (2025). Shcho take ESG i chomu tse vazhlyvo dlia vashoho biznesu [What is ESG and why it is important for your business]. Retrieved November 22, 2025. Available at: <https://csr.community/shho-take-esg-i-chomu-cze-vazhlyvo-dlya-vashogo-biznesu/>

3. Ofis Stalykh Rishen. (n.d.). Yaka riznytsia mizh CSR chy ESG i yak peretvoryty sotsialnu vidpovidalnist ta zadeklarovani tsinnosti na realnu konkurentnu perevahu? [What is the difference between CSR or ESG and how to turn social responsibility and declared values into a real competitive advantage?]. Retrieved November 20, 2025. Available at: <https://ukraine-oss.com/yaka-riznyczya-mizh-csr-chy-esg-i-yak-peretvoryty-soczialnu-vidpovidalnist-ta-zadeklarovani-czinnosti-na-realnu-konkurentnu-perevagu/>

4. Alves C. F., Meneses L. L. (2024). ESG scores and debt costs: Exploring indebtedness, agency costs, and financial system impact. *International Review of Financial Analysis*. 2024. Vol. 91. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2024.103240>

5. Fan Y., Liu C., Xia X. (2024). The Impact of ESG Performance on Corporate Financialization: Evidence from Chinese Listed Companies. *Finance Research Letters*. 2024. Vol. 62. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.62517/jbm.202509108>

6. Yin X.-N., Li J.-P., Su C.-W. (2023). How does ESG performance affect stock returns? Empirical evidence from listed companies in China. *Heliyon*. 2023. Vol. 9. P. 1-12. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16320>

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

О. В. КРИВДА

кандидат економічних наук,
доцент кафедри економіки і підприємництва
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-4398-6298

К. М. ДОНИК

магістрант
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0008-2709-5587

РЕЗЕРВИ УДОСКОНАЛЕННЯ КАДРОВОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНСЬКИХ ПІДПРИЄМСТВ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

У роботі досліджено особливості функціонування кадрової політики підприємств у сучасних умовах, що характеризуються тривалими економічними потрясіннями, демографічним спадом та поглибленням нестачі кваліфікованого персоналу. Розкрито комплекс чинників, які зумовлюють потребу в оновленні підходів до управління людськими ресурсами, серед яких посилення конкуренції за фахівців, зміна пріоритетів працівників, зростання ролі психологічної безпеки та необхідність підтримання стабільної мотиваційної системи. Особливу увагу приділено трансформації організаційних процесів під впливом цифровізації, переходу до дистанційної та змішаної зайнятості, необхідності швидкого перенавчання персоналу та нарощування компетентностей, актуальних для сучасної економіки. Проаналізовано ключові проблеми підприємств, що знижують їхню ефективність, зокрема відсутність системного підходу до планування кадрової роботи, низький рівень кадрової аналітики, неузгодженість між стратегічними цілями підприємства та реальною кадровою політикою, а також недостатній рівень інвестицій у розвиток персоналу. Визначено, що саме вдосконалення кадрової політики дозволяє сформувати якісну кадрову структуру, підвищити продуктивність праці, зменшити плинність кадрів, оптимізувати витрати та забезпечити довгострокову конкурентоспроможність.

Обґрунтовано необхідність впровадження сучасних інструментів HR-менеджменту, таких як компетентнісні моделі, системи оцінювання результатів, автоматизовані інформаційні платформи, методи прогнозування кадрових потреб, програми менторства та внутрішнього навчання. Показано, що формування ефективної кадрової політики потребує поєднання стратегічних і тактичних рішень, орієнтованих на залучення, утримання й розвиток працівників, а також створення адаптивного середовища, здатного реагувати на зовнішні виклики. Наголошено, що актуальність теми обумовлена необхідністю удосконалення кадрової політики для забезпечення стабільності, інноваційного розвитку та підвищення ефективності діяльності підприємств в умовах високої невизначеності та змінності ринку праці. Запропоновані підходи та рекомендації можуть бути використані для формування дієвої системи управління персоналом, що сприятиме зростанню результативності підприємства та зміцненню його позицій на ринку.

Ключові слова: кадрова політика, дефіцит кадрів, воєнний стан, психологічний стан, адаптація підприємств.

O. V. KRYVDA

PhD in Economics,
Associate Professor at the Department of Economics and Entrepreneurship
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0003-4398-6298

K. M. DONYK

Postgraduate Student
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0009-0008-2709-5587

RESERVES FOR THE IMPROVEMENT OF PERSONNEL POLICY OF UKRAINIAN ENTERPRISES UNDER THE CONDITIONS OF MARITAL STATE

The paper examines the features of the functioning of the personnel policy of enterprises in modern conditions, characterized by prolonged economic shocks, demographic decline and a deepening shortage of qualified personnel. A set of factors is revealed that determine the need to update approaches to human resources management, including increased competition for specialists, changing employee priorities, the growing role of psychological safety and the need to maintain a stable motivational system. Special attention is paid to the transformation of organizational processes under the influence of digitalization, the transition to remote and mixed employment, the need for rapid retraining of personnel and building competencies relevant for the modern economy. The key problems of enterprises that reduce their efficiency are analyzed, in particular; the lack of a systematic approach to personnel planning, a low level of personnel analytics, inconsistency between the strategic goals of the enterprise and real personnel policy, as well as an insufficient level of investment in personnel development. It is determined that it is the improvement of personnel policy that allows to form a high-quality personnel structure, increase labor productivity, reduce personnel turnover, optimize costs and ensure long-term competitiveness.

The need for the implementation of modern HR management tools, such as competency models, performance evaluation systems, automated information platforms, methods of forecasting personnel needs, mentoring programs and internal training, is substantiated. It is shown that the formation of an effective personnel policy requires a combination of strategic and tactical decisions focused on attracting, retaining and developing employees, as well as creating an adaptive environment capable of responding to external challenges. It is emphasized that the relevance of the topic is due to the need to improve personnel policy to ensure stability, innovative development and increase the efficiency of enterprises in conditions of high uncertainty and variability of the labor market. The proposed approaches and recommendations can be used to form an effective personnel management system that will contribute to increasing the efficiency of the enterprise and strengthening its positions in the market.

Key words: *personnel policy, shortage of personnel, martial law, psychological state, adaptation of enterprises.*

Постановка проблеми

З початком несправедливої та неоголошеної війни українські підприємства стикнулися з великою кількістю небачених раніше викликів. До них слід віднести зруйновану логістику, блокування морських портів, енергетичною кризою, девальвацією національної валюти, потребою у релокації бізнесу, зміни ринків збуту, швидкої трансформації бізнес-моделі, а головне дефіцитом кадрових ресурсів. Згідно результатів опитувань, проведеного Європейською Бізнес Асоціацією [7], проблема дефіциту кадрових ресурсів, складність знайти працівника з потрібною кваліфікацією стали одними з основних викликів для українського бізнесу протягом 2022-2024 рр.

Посилення мобілізаційних процесів, внутрішнє переміщення населення, вимушена міграція населення закордон ускладнюють ефективне управління персоналом на українських підприємствах. Кадрова політика у таких умовах стає ключовим інструментом для забезпечення стійкості та відновлення економічної активності підприємств, що робить питання її вдосконалення надзвичайно актуальним. Тому досить актуальним вбачається визначення резервів удосконалення кадрової політики, враховуючи особливості воєнного стану, щоб забезпечити її ефективність та сприяти стабільній роботі українських підприємств навіть в кризових умовах, викликаних війною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Варто зазначити, що тема кадрової політики є широко вивченою в сучасній науковій літературі. Велика кількість вчених присвятили свої наукові праці вивченню даної сфери. Зокрема, можемо виділити окремо науковий вклад: Смоквіної Г. А., Григор'євої А. В., Обіход С. В., Павлова В., Горбань С., Біленко О., Мельник Т., Шапи Н. М., Калініченко А. А. та інших. Попри значний науковий вклад дослідників у дану тему, питання пошуку резервів для підвищення ефективності кадрової політики українських підприємств в умовах воєнного стану залишається недостатньо дослідженим та потребує наукових розробок.

Формулювання мети дослідження

Метою даної статті є визначення резервів удосконалення кадрової політики українських підприємств в умовах воєнного стану.

Для досягнення даної мети виконано наступні завдання:

- досліджено вплив воєнного стану на кадрову ситуацію українських підприємств;
- визначено ключові проблеми та виклики кадрової політики українських підприємств в умовах воєнного стану;
- проаналізовано зміни кадрової політики на українських підприємства в умовах воєнного стану;
- запропоновано рекомендації для удосконалення кадрової політики українських підприємств в умовах воєнного стану.

Викладення основного матеріалу дослідження

Війна в Україні завдала значних збитків не лише економічній, але й соціальній та кадровій інфраструктурі. З кожним роком війни ці проблеми загострюються. Так, згідно даних Європейської Бізнес Асоціації у 2024 р. близько 74 % підприємств України відчувають гострий дефіцит кадрів, а роком раніше даний показник складав 55 %. Таке

відчутне зростання зумовлено, у першу чергу, посиленням мобілізаційних процесів у країні. Міністерство економіки України оцінює дефіцит кадрів у розмірі 4,5 млн. працівників [1].

Зазначимо, що однією з головних проблем кадрової політики українських підприємств став масовий виїзд працівників за кордон у пошуках безпеки та кращих умов життя, що призвело до дефіциту робочої сили. Крім того, підприємства змушені були скоротити або зупинити виробництво через дефіцит кадрів. Зокрема, швейне виробництво Б. Шпака при виробничих потужностях розрахованих на 50 осіб має у своєму розпорядженні лише 20 осіб. Відповідно працює підприємство лише на 40 % від проєктної потужності. Дана ситуація не є одиничною та типовою для більшості підприємств [1].

Н. М. Шапа та А. А. Калініченко [6] наголошують, що в умовах воєнного стану зберегти високий рівень мотивації та продуктивності працівників стало складніше через постійні стресові ситуації, психологічний тиск та нестабільність. Люди звільняються з роботи через страх за своє життя чи втрату житла. Втрата ключових співробітників призводить до зниження ефективності виробничого процесу і необхідності пошуку тимчасової або постійної заміни.

Також не можна відкидати проблеми, пов'язані з мобілізацією до лав ЗСУ громадян. Через посилення мобілізаційних процесів частина чоловіків відчувають страх та відмовляються офіційно працевлаштовуватися, віддаючи перевагу безробіттю чи шукають варіанти дистанційної роботи. Сучасний розвиток інтернет-технологій, спеціалізованих онлайн-платформ надають змогу працювати копірайтингом, веб-верстальником, SMM-менеджером з дому без офіційного працевлаштування та відповідно не бути поміченим у державних реєстрах. Даний спосіб хоч і є незаконним, але є поширеними через наслідки воєнного стану в Україні.

На проблему з пошуком працівників з необхідними навичками та знаннями звертає увагу й науковиця Т. Мельник [2]. Вона акцентує увагу на нерівномірному географічному розподілі робочої сили. Зокрема, у регіонах, які найбільше страждають від військових дій відчувається більший кадровий дефіцит. Водночас регіони, які прийняли велику кількість внутрішніх вимушених переселенців мають менший дефіцит кадрів. До таких регіонів слід віднести насамперед Київську, Полтавську, Львівську, Івано-Франківську, Закарпатську області.

Окрім проблеми дефіциту кадрів, актуальною є невідповідність знань та навичок працівників вакантним посадам. Велика кількість підприємств через війну втратили висококваліфікованих, вузькоспеціалізованих кадрів, а знайти відповідного профілю гідну зміну є досить складним завданням. Частково за допомогою держави дана проблема вирішується завдяки бронюванню працівників. Однак цією можливістю можуть скористатися лише підприємства, які підпадають під критерії критичної важливості. Особливо гострою дана проблема є для трудомістких галузей, таких як сільське господарство, текстильна промисловість, логістика тощо.

Ще одним негативним наслідком воєнного стану є психологічний стан працівників. Постійна загроза обстрілів, тривожні новини, невпевненість у майбутньому призводять до зниження мотивації та ефективності роботи. Багато працівників вирішують залишити роботу не через безпосередню небезпеку, а через психологічний тиск і страх за своє життя чи життя своїх близьких. Особливо поширене це явище серед людей, які працюють у районах, наближених до зон бойових дій [2].

Узагальнюючи вищенаведене, до ключових проблем та викликів кадрової політики українських підприємств в умовах воєнного стану можна віднести наступні [1, 2, 5-6]:

- загальний дефіцит кадрів через міграцію населення та мобілізаційні процеси;
- проблеми постійної небезпеки та частих повітряних тривог;
- невідповідність у працівників вмін та знань вимогам посад;
- емоційне виснаження та психологічне перевантаження працівників;
- зростання потреби у розвитку цифрових навичок персоналу;
- підвищення вартості трудових ресурсів.

Це не вичерпаний перелік усіх проблем, викликаних війною та її наслідками, а лише головні, які найбільш поширені для українського бізнесу. Українські підприємства працюють постійно над адаптацією кадрової політики до цих умов та вирішенню наявних проблем. Особливої уваги заслуговує досвід великих підприємств України, які відомі ефективною кадровою політикою та мають високі фінансові можливості.

Зокрема, аграрне підприємство «Агропросперіс» організували безкоштовні внутрішні програми навчання для трактористів, комбайнерів та інших посад, що дозволило досить оперативно замінювати працівників у разі їх звільнення чи мобілізації [1]. Таку ж практику сповідує й «МХП», яка організувала центр навчання з метою постійного навчання й розвитку компетенцій персоналу, щоб їх вміння відповідали вимогам ринку [3].

Охоронна компанія «SHERIFF» в умовах воєнного стану змушена була переглянути свою кадрову політику шляхом залучення працівників, які не підпадають під мобілізацію. Зокрема, до війни у даній компанії працювали охоронці віком 25-45 років, але з початком мобілізації віковий діапазон змінився на 20-55 років [1].

Компанія «Варус» з метою налагодження морально-психологічного клімату в трудовому колективі, психологічній підтримці працівників ввела посаду психолога у штат. Окрім того за рахунок компанії проводяться психологічні тренінги, для працівників, які потребують психологічної допомоги додатково оплачуються послуги

психолога. Як правило, це стосуються працівників, які перебували в окупації або ж члени їх родин постраждали через військові дії, знаходяться у полоні [4].

Компанія «Eldorado» запустила проєкт «Поможи тобі бот», що дозволило автоматизувати частину кадрових процесів. З запуском даного проєкту працівники мають можливість у декілька кліків через чат-бот дізнатися залишок днів відпустки, оформити відрядження, замовити довідку тощо. Це суттєво знизило навантаження на працівників HR-відділу, а також пришвидшило процесу отримання відповідних довідок для працівників [3].

На основі розглянутих успішних кейсів можемо констатувати, що українські підприємства по-різному підходять до адаптації своєї кадрової політики. У першу чергу звертають увагу на ключові проблеми, з якими стикаються в частині HR-менеджменту. Об'єднує усіх те, що в центрі уваги знаходяться інноваційні технології, які дозволяють не лише вирішити наявні проблеми, але й підвищити ефективність кадрової політики українських підприємств.

Г. А. Смоквіна та А. В. Григор'єва [5] у своєму дослідженні прийшли до висновку, що сучасний ринок вимагає використання нових підходів та методів ведення кадрової політики. Ринок праці в Україні в майбутньому вже буде кардинально іншим, аніж був раніше. Нові складові кадрової політики виступають основною умовою функціонування будь-якого підприємства в Україні в сучасних умовах. До яких можна віднести: психологічну підтримку працівників, менеджмент корисних чатів, гарантії соціального пакета, вчасне інформування.

Зважаючи на сучасні кризові умови, викликані воєнним станом, єдиним правильним кроком для представників українського бізнесу є трансформація кадрової політики. Під трансформацією розуміється внесення змін у її основні складові (підбір персоналу, адаптацію, мотивація, навчання тощо), імплементацію інноваційних технологій, що з одного боку враховуватиме потреби персоналу та зменшуватиме негативний вплив воєнного стану. Вивчаючи успішний досвід передових компаній України, а саме «Еліцентр», «Нова Пошта», «МХП», «Варус», «Eldorado», а також урахування сучасних трендів можемо запропонувати рекомендації для удосконалення кадрової політики українських підприємств в умовах воєнного стану, що наведені на рис. 1.



Рис. 1. Рекомендації для удосконалення кадрової політики українських підприємств в умовах воєнного стану

Джерело: авторська розробка

В умовах воєнного стану головний тренд кадрової політики українських підприємств повинен бути зосереджений на психологічній підтримці працівників, інклюзії осіб з обмеженими можливостями, інтеграції AI-агентів для автоматизації кадрових процесів та створенні безпечних умов для роботи. Забезпечення соціальної стабільності та психологічної підтримки співробітників допомагає знизити рівень стресу та підвищити їхню лояльність до компанії, що є особливо важливим в умовах кризових ситуацій. Інтеграція сучасних технологій, таких як AI-агенти, дозволяє знизити навантаження на працівників, делегувати таким агентам рутинні кадрові процеси. Важливим аспектом є також постійне врахування потреб співробітників і регулярне отримання відгуків щодо рівня задоволення кадровою політикою, що дозволяє оперативного коригувати стратегії і забезпечувати стабільність та ефективність роботи підприємства.

Висновки

Таким чином, кадрова політика є важливим елементом будь-якого бізнесу. В умовах воєнного стану українські підприємства повинні забезпечити її швидку трансформацію з метою адаптації до нових викликів й зменшення їх негативного впливу. Головною проблемою українського бізнесу в даних умовах є дефіцит кадрових ресурсів внаслідок мобілізаційних процесів та міграції населення. На ринку праці складно знайти потрібних працівників з необхідним рівнем кваліфікації та професійними навичками. Тому важливо враховувати зазначені обставини при формулюванні кадрової політики. У таких умовах вважаємо кадрову політику українських підприємств повинна базуватися таких постулатах, як: цифровізація, психологічна підтримка, інтеграція AI-агентів, безпека, стратегічне партнерство з закладами вищої освіти, інклюзія, умови для дистанційного навчання тощо. Саме на цих постулатах повинна базуватися сучасна кадрова політика українських підприємств в умовах воєнного стану.

Українським підприємствам необхідно постійно стежити за ситуацією, удосконалювати кадрову політику, інтегрувати у неї інноваційні технології. Подальші дослідження у даній сфері будуть приділені вивченню ефективних кейсів вітчизняних підприємств щодо удосконалення кадрової політики, а також психологічним аспектам підтримки працівників та розвитку інклюзивних ініціатив для осіб з обмеженими можливостями в умовах воєнного стану.

Список використаної літератури

1. Кадрова криза в Україні: як брак спеціалістів загрожує економіці та бізнесу. URL: <https://www.rbc.ua/rus/news/kadrova-kriza-ukrayini-k-brak-spetsialistiv-1727103044.html> (дата звернення: 03.01.2024)
2. Мельник Т. Український бізнес в умовах війни: сучасний стан, виклики та шляхи їх вирішення. *Journal of Innovations and Sustainability*. 2023. № 7 (3). URL: <https://is-journal.com/is/article/view/207> (дата звернення: 03.01.2024)
3. Обіход С. В. Інноваційні підходи до управління персоналом як фактор конкурентоспроможності у контексті глобальної нестабільності. *Економіка, управління та адміністрування*. 2024. № 1 107. С. 3-9.
4. Павлова В., Горбань С., Біленко О. Інноваційні технології управління персоналом в умовах глобальної нестабільності. *Наукові перспективи*. 2023. № 4 (34). С. 279-290.
5. Смоквіна Г. А., Григор'єва А. В. Роль кадрової політики в сучасних умовах: статистичний огляд та передумови розвитку. *ЕКОНОМІКА: реалії часу = ECONOMICS: time realities*. Одеса, 2022. № 6 (64). С. 40-46.
6. Шапа Н. М., Калініченко А. А. Проблема плинності кадрів на підприємствах в умовах воєнного стану та шляхи її вирішення. *Економічний простір*. 2024. № 195. С. 102-107.
7. ЕВА. <https://eba.com.ua/research/doslidzhennya-ta-analytika/> (дата звернення: 03.01.2024)

References

1. Kadrova kryza v Ukraini: yak brak spetsialistiv zahrozhuye ekonomitsi ta biznesu (2024) [Personnel crisis in Ukraine: how the lack of specialists threatens the economy and business]. <https://www.rbc.ua/rus/news/kadrova-kriza-ukrayini-k-brak-spetsialistiv-1727103044.html>
2. Melnyk T. (2023) Ukrayins'kyu biznes v umovakh viyny: suchasnyy stan, vyklyky ta shlyakhy yikh vyrishennya [Ukrainian business in wartime: current state, challenges and ways to solve them]. *Journal of Innovations and Sustainability*, no. 7 (3). <https://is-journal.com/is/article/view/207> (дата звернення: 03.01.2024)
3. Obykhod S. V. (2024) Innovatsiyni pidkhody do upravlinnya personalom yak faktor konkurentospromozhnosti u konteksti hlobal'noyi nestabil'nosti [Innovative approaches to personnel management as a factor of competitiveness in the context of global instability]. *Economics, Management and Administration*, no. 1, pp. 3-9.
4. Pavlova V., Gorban S., Bilenko O. (2023) Innovatsiyni tekhnolohiyi upravlinnya personalom v umovakh hlobal'noyi nestabil'nosti [Innovative technologies of personnel management in conditions of global instability]. *Scientific perspectives*, 2023, no. 4 (34), pp. 279-290.
5. Smokvina G. A., Grigor'yeva A. V. (2022) Rol' kadrovoyi polityky v suchasnykh umovakh: statystychnyy ohlyad ta peredumovy rozvytku [The role of personnel policy in modern conditions: statistical review and development prerequisites]. *ECONOMICS: time realities*, no. 6 (64), pp. 40-46.

6. Shapa N. M., Kalinichenko A. A. (2024) Problema plynnosti kadriv na pidpryyemstvakh v umovakh voyennoho stanu ta shlyakhy yiyi vyrishennya [The problem of personnel turnover at enterprises under martial law and ways to solve it]. *Economic Space*, no. 195, pp. 102-107.

7. European Business Association (2024). <https://eba.com.ua/research/doslidzh-ennya-ta-analytyka/>

Дата першого надходження рукопису до видання: 20.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 18.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

О. В. ПИСАРЧУК

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри обліку і бізнес-консалтингу
Харківський національний економічний університет
імені Семена Кузнеця
ORCID: 0000-0001-6674-9223

ОБЛІКОВО-АНАЛІТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЕРЖАВНО-ПРИВАТНОГО ПАРТНЕРСТВА У ФІНАНСУВАННІ ВИСОКОВИТРАТНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

У статті досліджено проблематику формування обліково-аналітичного забезпечення державно-приватного партнерства (ДПП) у фінансуванні підготовки фахівців в умовах обмеженості бюджетних ресурсів та зростання потреб економіки у висококваліфікованому людському капіталі. Метою статті є обґрунтування концептуальних засад побудови цілісної обліково-аналітичної системи супроводу партнерських проектів у сфері вищої освіти з урахуванням специфіки ресурсомістких освітніх програм. Авторський внесок полягає в систематизації концептуальних зон суперечностей у сфері обліку операцій ДПП, поглибленні підходів до калькулювання собівартості освітніх послуг за високовитратними спеціальностями, а також у розширенні аналітичного інструментарію для оцінювання результативності партнерських моделей.

У роботі розкрито методологічні обмеження традиційного бюджетного обліку у відображенні внесків приватних партнерів, зокрема у формі нематеріальних активів, інтелектуальної власності та послуг, обґрунтовано необхідність деталізації витрат і перегляду підходів до розподілу накладних витрат між освітніми програмами. Наукову новизну дослідження становить концептуалізація обліково-аналітичної моделі забезпечення ДПП у фінансуванні високовитратних спеціальностей з урахуванням ризиків, міжчасового розподілу вигід та соціально-економічних ефектів. Обґрунтовано роль цифровізації облікових процесів та інтегрованої звітності як інструментів підвищення прозорості, відтворюваності інформаційних потоків і довіри між учасниками партнерської взаємодії. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання закладами вищої освіти для вдосконалення систем управлінського обліку, формування аргументованих фінансових розрахунків для залучення приватних інвестицій, а також органами публічного управління у процесі розроблення механізмів підтримки високовитратних спеціальностей. Зроблено висновок, що ефективність ДПП у сфері вищої освіти безпосередньо залежить від узгодженості облікових процедур, розвитку аналітичних інструментів, удосконалення нормативно-правового регулювання та впровадження цифрових інформаційних систем, здатних забезпечити комплексну оцінку фінансових і суспільних результатів партнерських проектів.

Ключові слова: державно-приватне партнерство; фінансування; калькулювання собівартості освітніх послуг; управлінський облік; соціально-економічна результативність; інвестиції; людський капітал.

O. V. PYSARCHUK

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Accounting and Business Consulting
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics
ORCID: 0000-0001-6674-9223

ACCOUNTING AND ANALYTICAL SUPPORT FOR PUBLIC-PRIVATE PARTNERSHIPS IN FINANCING HIGH-COST SPECIALITIES

In the current conditions of transformation of the higher education system, limited budget resources and growing competition for qualified specialists, the problem of forming effective mechanisms for financing high-cost specialities is becoming particularly relevant. The purpose of the article is to provide a theoretical justification and practical disclosure of the role of accounting and analytical support in the structure of public-private partnerships as a tool for optimising financial flows in the field of specialist training. The author's contribution to solving the problem under study focuses on systematising the methodological contradictions inherent in accounting in partnership models and proposing hybrid approaches that combine budgetary, commercial and management accounting to increase the transparency and objectivity of assessing the contributions of the parties, in particular through the differentiation of direct and indirect costs, as well as the integration of digital tools for scenario modelling of financial risks. The scientific novelty lies in the development of a matrix of conceptual contradictions that takes into account the specifics of educational activities and the peculiarities of accounting processes.

The practical significance of the results lies in their applicability to improving the financial policies of universities, business structures and government agencies, in particular through the introduction of integrated reporting that combines financial and non-financial indicators to assess the effectiveness of partnership projects, as well as in the formation of methodological guidelines for calculating the cost of educational services, taking into account the specifics of high-cost specialities, which helps to reduce the risks of underfunding and improve the quality of training. The main conclusions of the study emphasise that strengthening accounting and analytical support in public-private partnerships not only optimises resource flows but also creates the conditions for a synergistic effect, where investment in education becomes a strategic resource for national competitiveness, although they require radical modernisation of the regulatory framework and organisational structures to overcome methodological barriers and ensure transparency in the interaction between the parties.

Key words: *public-private partnership; financing; costing of educational services; management accounting; socio-economic performance; investments; human capital.*

Постановка проблеми

Сучасний етап розвитку вітчизняної системи вищої освіти характеризується поглибленням дисбалансу між фінансовими потребами закладів вищої освіти та обмеженими можливостями державного бюджету щодо їх повноцінного задоволення. Особливої гостроти ця проблема набуває у контексті підготовки фахівців за високовитратними спеціальностями, де вартість навчального процесу істотно перевищує середні показники через необхідність забезпечення дороговартісним обладнанням, специфічними лабораторіями, матеріалами, реактивами та залучення висококваліфікованих науково-педагогічних кадрів [10]. Системне недофінансування цих напрямів підготовки призводить до поступової деградації матеріально-технічної бази, відтоку талановитих викладачів до приватного сектору та зниження якості освітніх послуг, що в довгостроковій перспективі загрожує втратою конкурентоспроможності національної економіки на глобальному ринку кваліфікованої робочої сили. Водночас вітчизняна практика свідчить про зростаючу зацікавленість бізнес-структур у співпраці з університетами, зумовлену гострим дефіцитом кваліфікованих кадрів у високотехнологічних галузях економіки. Механізм державно-приватного партнерства (ДПП) потенційно здатний забезпечити синергетичний ефект від поєднання інституційних можливостей держави, фінансових ресурсів приватного сектору та інтелектуального потенціалу закладів вищої освіти. Проте реалізація цього потенціалу натикається на низку суттєвих перешкод методологічного, організаційного та інформаційного характеру, серед яких особливе місце посідає проблема формування адекватного обліково-аналітичного забезпечення партнерських відносин між державою, бізнесом та університетами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика формування дієвих механізмів фінансового забезпечення вищої освіти посідає помітне місце в сучасному українському науковому дискурсі. У працях дослідників простежується стійка тенденція до поглибленого аналізу структурних дисбалансів бюджетного фінансування, обмежень індикативної вартості [11], а також пошуку альтернативних моделей залучення ресурсів, серед яких особливу увагу привертають механізми ДПП.

Так, у роботах Д. Гладких та К. Малафеевої [1] акцентовано на системних проявах недофінансування ключових напрямів підготовки та на необхідності формування нових підходів до фінансової підтримки ЗВО, враховуючи зростання вартості освітніх послуг та обмеженість бюджетних можливостей. Аналогічні висновки містяться у дослідженнях Л. Гейко та М. Кузнецової [2], які зауважують, що існуючі механізми фінансування не відповідають специфіці сучасних освітніх потреб і не забезпечують необхідного рівня гнучкості у розподілі ресурсів між спеціальностями різного рівня витратності.

Окремий пласт наукової літератури присвячено аналізу ДПП як потенційного джерела компенсації бюджетних обмежень. У роботах О. Маліна [7] простежується узагальнення ключових тенденцій ДПП в Україні та світі, зокрема підкреслюється зростання ролі партнерських моделей у фінансуванні суспільно значущих сфер, включаючи освіту. Подібної логіки дотримуються й дослідники зарубіжних освітніх систем, так Antony Moss [18] демонструє, що в умовах ресурсних обмежень саме партнерські та гібридні фінансові моделі здатні забезпечити стійкість функціонування сектора вищої освіти, хоча їх ефективність значною мірою залежить від прозорості облікових процедур та зрілості аналітичних інструментів у закладах освіти.

У контексті середньострокового бюджетного планування важливими є результати дослідження О. Кириленка та Б. Малиняка [4], котрі звертають увагу на невідповідність існуючих підходів фактичним фінансовим потребам освітніх програм та необхідність переосмислення бюджетних інструментів підтримки високовитратних спеціальностей. У роботах авторських колективів під керівництвом Л. Лисяк [6] та Л. Мельник [8] наголошується на необхідності глибшого розуміння структури витрат, детального моделювання собівартості та підвищення ролі управлінської аналітики у процесі прийняття рішень у сфері освіти. Автори підкреслюють недостатність наявних облікових методик для адекватної оцінки реальної вартості підготовки здобувачів та визначення оптимальних фінансових механізмів їх підтримки.

Разом із тим, незважаючи на суттєву кількість праць, присвячених фінансуванню вищої освіти та окремим аспектам партнерської взаємодії між державними інституціями та приватним сектором, слід констатувати

наявність істотних прогалин. Зокрема, майже відсутні комплексні дослідження, що інтегрували б проблеми бюджетного обліку, управлінського аналізу, оцінювання ризиків, цифровізації та правового регулювання партнерських відносин у єдину методологічну рамку, релевантну для високовитратних спеціальностей. Недостатньо опрацьованими залишаються питання вартісної оцінки внесків приватних партнерів, механізмів облікового відображення спільно створених активів, розподілу ризиків між сторонами та визначення соціально-економічних ефектів партнерства, що мають довгостроковий характер і не відображаються у традиційних системах звітності. Таким чином, попри значний науковий доробок у сфері фінансування вищої освіти та окремі спроби окреслення проблематики ДПП, залишається невирішеною важлива частина загальної проблеми як формування цілісної, науково обґрунтованої моделі обліково-аналітичного забезпечення партнерських проєктів, яка враховувала б специфіку спеціальностей, особливості їх ресурсомісткості, інституційні обмеження бюджетної системи та інформаційні потреби бізнес-середовища.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є наукове обґрунтування та концептуалізація обліково-аналітичного забезпечення ДПП у фінансуванні підготовки фахівців з вищою освітою, що передбачає ідентифікацію ключових методологічних суперечностей, визначення специфіки обліку витрат, розроблення аналітичних підходів до оцінювання партнерських моделей та окреслення напрямів удосконалення інформаційної підтримки управлінських рішень у сфері вищої освіти.

Викладення основного матеріалу дослідження

Фундаментальна складність облікового відображення операцій у форматі ДПП полягає у необхідності одночасного задоволення вимог різноманітних облікових систем, що функціонують за власною внутрішньою логікою та керуються відмінними нормативно-правовими регуляторами. Державні заклади вищої освіти традиційно застосовують методологію бюджетного обліку, орієнтовану на забезпечення прозорості використання бюджетних коштів та контроль за цільовим витрачанням державних ресурсів. Натомість приватні партнери функціонують в парадигмі комерційного обліку, де пріоритетними є принципи економічної доцільності, рентабельності інвестицій та максимізації акціонерної вартості [13]. Спроби механічного поєднання цих двох облікових філософій неминуче призводять до виникнення концептуальних протиріч та методологічних суперечностей, що ускладнюють формування цілісної системи обліково-аналітичного забезпечення партнерських проєктів.

Особливої актуальності набуває проблема економічної класифікації та облікового визнання внесків приватного партнера, які можуть набувати різноманітних форм, від прямого фінансування до надання обладнання, програмного забезпечення, інтелектуальної власності чи людських ресурсів. Відсутність чітких методичних підходів до вартісної оцінки таких внесків, особливо коли йдеться про нематеріальні активи або послуги, створює сприятливе середовище для маніпулювання звітними показниками та ускладнює об'єктивну оцінку внеску кожної зі сторін у реалізацію спільного проєкту. Водночас недостатньо опрацьованими залишаються питання розподілу прав власності на результати спільної діяльності [13], зокрема на інтелектуальну власність, створену в процесі реалізації партнерських проєктів, що породжує значні юридичні та облікові ризики для всіх учасників взаємодії. Зважаючи на зазначене, було виокремлено низку концептуальних зон суперечностей, притаманних обліково-аналітичному забезпеченню ДПП у фінансуванні високовитратних спеціальностей (рис. 1). Їх систематизація створює підґрунтя для подальшого аналізу специфіки обліку витрат, аналітичних процедур та цифрових інструментів у форматі партнерської взаємодії

Так, система калькулювання собівартості освітніх послуг у закладах вищої освіти традиційно характеризується високим рівнем узагальнення та орієнтацією на визначення середніх показників у розрізі напрямів підготовки або факультетів. Така методологія виявляється категорично неадекватною для цілей обґрунтування потреби у залученні приватних інвестицій у високовитратні спеціальності, оскільки не дозволяє деталізувати структуру витрат та ідентифікувати специфічні статті, що зумовлюють підвищену ресурсомісткість відповідних освітніх програм. Формування переконливої аргументації для потенційних приватних партнерів вимагає принципово іншого рівня деталізації облікової інформації, здатної продемонструвати конкретні напрями використання інвестиційних ресурсів та обґрунтувати економічну доцільність участі бізнесу у фінансуванні підготовки кадрів.

Принципово важливою постає проблема розмежування витрат [3], безпосередньо пов'язаних із підготовкою студентів за високовитратними спеціальностями, та непрямих витрат на утримання загальноуніверситетської інфраструктури. Традиційні методи розподілу накладних витрат, що застосовуються у вітчизняних закладах вищої освіти, базуються здебільшого на спрощених алгоритмах пропорційного віднесення витрат за формальними критеріями, зокрема, кількість студентів, викладачів, площа приміщень тощо, без урахування реального споживання ресурсів конкретними освітніми програмами. Така методологія систематично спотворює реальну картину ресурсомісткості високовитратних спеціальностей та ускладнює обґрунтування розміру необхідного фінансування з боку приватних партнерів.



Рис. 1. Матриця концептуальних суперечностей у сфері обліково-аналітичного забезпечення ДПП

Джерело: авторська розробка

Водночас варто наголосити на недостатній розробленості методичних підходів до обліку специфічних категорій витрат, характерних саме для високовитратних спеціальностей. Зокрема, проблематичним залишається питання облікового відображення витрат на швидкооновлюване обладнання та програмне забезпечення, моральне старіння яких відбувається значно швидше за фізичне зношування. Класичні методи нарахування амортизації виявляються неадекватними для таких активів, що призводить до систематичного заниження реальної потреби у оновленні матеріально-технічної бази та, як наслідок, до недофінансування відповідних освітніх програм. Ефективність ДПП у сфері вищої освіти значною мірою детермінується якістю аналітичного забезпечення процесу прийняття стратегічних та оперативних управлінських рішень. Традиційна система економічного аналізу діяльності закладів вищої освіти, сформована в умовах домінування бюджетного фінансування [15], орієнтована переважно на констатацію фактів виконання або невиконання планових показників та аналіз причин відхилень у контексті дотримання бюджетної дисципліни. Така аналітична парадигма виявляється непридатною для потреб партнерських проєктів, де критично важливою стає здатність до прогностичного аналізу, оцінки альтернативних сценаріїв розвитку подій, моделювання фінансових потоків та обґрунтування очікуваного ефекту від реалізації спільних ініціатив.

Особливої значущості набуває проблема формування системи ключових індикаторів ефективності [14], здатних задовольнити інформаційні потреби всіх учасників партнерської взаємодії. Державні органи управління традиційно орієнтуються на кількісні показники, пов'язані з обсягами підготовки фахівців [12], рівнем їх працевлаштування та вартістю навчання. Натомість приватні партнери зацікавлені у якісних характеристиках випусників, рівні їх готовності до виконання конкретних професійних функцій, швидкості адаптації до виробничого середовища. Заклади вищої освіти, своєю чергою, прагнуть зберегти автономію у визначенні змісту освітніх програм та академічну свободу викладачів [9]. Узгодження цих різновекторних інтересів вимагає формування збалансованої системи показників, здатної забезпечити справедливую оцінку внеску кожної сторони та результативності партнерства в цілому.

Недостатньо розробленими залишаються методичні підходи до оцінки ризиків, притаманних проєктам ДПП у сфері освіти. Специфіка освітньої діяльності полягає у значному часовому лазі між моментом інвестування ресурсів та отриманням результату у вигляді кваліфікованих випусників, здатних ефективно функціонувати на ринку праці. Протягом цього періоду можуть відбутися суттєві зміни у кон'юктурі ринку праці, технологічних укладах, регуляторному середовищі, що здатне кардинально змінити первинні умови партнерської угоди та поставити під сумнів доцільність продовження співпраці [5]. Відсутність апробованих методик ідентифікації, оцінки та управління такими ризиками створює додаткові бар'єри для залучення приватних інвестицій у високовитратні освітні програми.

Сучасний рівень розвитку інформаційних технологій теоретично відкриває широкі можливості для автоматизації обліково-аналітичних процесів та формування інтегрованих інформаційних систем, здатних забезпечити всіх учасників ДПП релевантною та своєчасною інформацією для прийняття управлінських рішень. Проте практична

реалізація цього потенціалу стикається з численними перешкодами технічного, організаційного та методологічного характеру. Переважна більшість вітчизняних закладів вищої освіти використовують інформаційні системи, розроблені переважно для потреб бюджетного обліку та формування регуляторної звітності, функціонал яких категорично не відповідає вимогам управлінського обліку та аналізу в умовах партнерської взаємодії з бізнес-структурами. Фрагментарність та несумісність інформаційних систем, що використовуються різними учасниками партнерства, унеможливує формування єдиного інформаційного простору та вимагає значних додаткових витрат на узгодження форматів даних, їх консолідацію та трансформацію для потреб різних користувачів. Особливо проблемним виявляється питання забезпечення прозорості та доступності інформації для приватних партнерів при одночасному дотриманні вимог законодавства щодо захисту інформації з обмеженим доступом та персональних даних здобувачів освіти. Відсутність чітких регламентів розмежування інформації, що підлягає обов'язковому розкриттю для партнерів, та даних конфіденційного характеру створює ризики як надмірного обмеження доступу до інформації, так і порушення вимог інформаційної безпеки.

Потребує переосмислення роль та функціонал бухгалтерських служб закладів вищої освіти в умовах реалізації проєктів ДПП. Традиційна орієнтація на виконання контрольно-облікових функцій та формування регуляторної звітності має бути доповнена аналітичними компетенціями, здатністю до стратегічного планування, фінансового моделювання та комунікації з широким колом стейкхолдерів, що має кардинально інші пріоритети та використовує відмінний понятійний апарат порівняно з традиційними суб'єктами бюджетних відносин. Це, своєю чергою, вимагає суттєвої трансформації системи підготовки та підвищення кваліфікації працівників бухгалтерських служб закладів вищої освіти, яка наразі залишається консервативною та недостатньо адаптованою до викликів нової економічної реальності.

Регуляторна база, що регламентує облік операцій у закладах вищої освіти, сформувалася історично в умовах домінування державної власності та бюджетного фінансування [16], що зумовило її орієнтацію на забезпечення контролю за використанням державних коштів та дотримання бюджетної дисципліни. Поява нових форм взаємодії з приватним сектором виявила суттєві прогалини у нормативно-правовому регулюванні, які ускладнюють практичну реалізацію партнерських проєктів та створюють ризики неоднозначного тлумачення правових норм різними учасниками відносин. Зокрема, недостатньо врегульованими залишаються питання правового статусу майна [13], переданого приватним партнером у користування закладу вищої освіти, порядку його обліку на балансі університету та механізмів повернення після завершення строку дії партнерської угоди.

Проблематичним є також питання податкового статусу операцій, здійснюваних в межах ДПП. Чинне податкове законодавство не містить спеціальних норм, що враховували б специфіку освітньої діяльності та партнерських відносин у цій сфері, що призводить до необхідності застосування загальних правил оподаткування, часто недоречних для некомерційних за своєю природою освітніх проєктів. Неоднозначність у кваліфікації окремих операцій для цілей оподаткування створює додаткові фіскальні ризики як для закладів вищої освіти [17], так і для їх приватних партнерів, що стримує розвиток партнерських відносин та змушує учасників витрачати значні ресурси на податкове планування та мінімізацію ризиків.

Окремої уваги заслуговує проблема адаптації міжнародних стандартів фінансової звітності для цілей відображення операцій ДПП у вітчизняних закладах вищої освіти. Міжнародна практика напрацювала певні підходи до обліку партнерських угод, зокрема в рамках МСФЗ для державного сектору, проте їх механічне перенесення на вітчизняний ґрунт без урахування національної специфіки правового регулювання освітньої діяльності, традицій організації облікового процесу та менталітету користувачів фінансової інформації може призвести до формування звітності, незрозумілої для вітчизняних стейкхолдерів та непридатної для прийняття управлінських рішень. Водночас ігнорування міжнародного досвіду загрожує подальшою ізоляцією національної системи обліку та ускладненням інтеграції вітчизняних закладів вищої освіти у глобальний освітній простір.

Слід акцентувати увагу на соціально-економічних ефектах у сфері вищої освіти [9]. Фундаментальна особливість проєктів ДПП у сфері освіти полягає у генерації значних позитивних зовнішніх ефектів, що виходять далеко за межі безпосередніх результатів підготовки конкретної кількості фахівців для потреб приватного партнера. Підвищення якості освітніх послуг, модернізація матеріально-технічної бази, залучення досвідчених практиків до викладацької діяльності створюють мультиплікативний ефект, що поширюється на всю систему вищої освіти регіону та сприяє підвищенню конкурентоспроможності національної економіки в цілому. Проте традиційні підходи до обліку та аналізу результатів діяльності закладів вищої освіти не передбачають інструментарію для ідентифікації, вартісної оцінки та відображення у звітності таких екстернальних ефектів, що призводить до систематичного недооцінювання суспільної цінності партнерських проєктів. Особливо складності набуває проблема вартісної оцінки соціального капіталу, що формується в процесі партнерської взаємодії між університетами та бізнесом. Мережі взаємозв'язків між науковцями, викладачами, представниками бізнесу та студентами створюють унікальне середовище для обміну знаннями, генерації інновацій, трансферу технологій, ефект від якого може значно перевищувати прямі фінансові результати партнерства. Водночас монетизація та облікове відображення таких нематеріальних результатів вимагає застосування складних методик оцінювання, що базуються

на імовірнісних судженнях та містять значну частку суб'єктивізму, що ускладнює їх використання для цілей формальної звітності та порівняння результативності різних партнерських проектів.

Недостатньо дослідженою залишається проблема міжчасового розподілу вигод від реалізації партнерських проектів між поточними та майбутніми періодами. Інвестиції у підготовку фахівців за високовитратними спеціальностями генерують економічні та соціальні вигоди протягом всього періоду їх професійної діяльності, що може становити кілька десятиліть. Традиційний касовий метод обліку, орієнтований на відображення операцій у момент їх здійснення, виявляється непридатним для відображення довгострокового характеру ефектів від освітньої діяльності, що вимагає розробки альтернативних підходів до капіталізації освітніх інвестицій та визнання їх впливу на майбутні економічні вигоди. Формування адекватної системи обліково-аналітичного забезпечення ДПП у фінансуванні високовитратних спеціальностей вимагає комплексного підходу, що поєднує удосконалення методологічних засад обліку, розвиток аналітичного інструментарію, цифровізацію облікових процесів та трансформацію організаційних структур, відповідальних за ведення обліку та формування звітності. Важливою є розробка спеціалізованих галузевих стандартів обліку для закладів вищої освіти, що враховували б специфіку освітньої діяльності та особливості партнерських відносин з бізнес-структурами. Такі стандарти мають забезпечити оптимальний баланс між потребою у деталізації облікової інформації для цілей управління партнерськими проектами та необхідністю дотримання вимог бюджетного законодавства щодо обліку та звітності розпорядників бюджетних коштів. Впровадження методології інтегрованої звітності дозволить поєднати фінансову інформацію з показниками нефінансового характеру та продемонструвати взаємозв'язок між різними видами капіталу фінансовим, виробничим, інтелектуальним, людським, соціальним, що використовуються та створюються в процесі реалізації партнерських проектів. Така звітність здатна забезпечити більш повне розуміння вартості, що створюється закладом вищої освіти для всіх груп стейкхолдерів, та обґрунтувати доцільність участі приватного бізнесу у фінансуванні освітніх програм навіть за відсутності прямого фінансового результату у короткостроковій перспективі.

Особливої уваги потребує розвиток системи управлінського обліку, орієнтованого на специфічні інформаційні потреби менеджменту партнерських проектів. Це передбачає впровадження сучасних методів калькулювання собівартості освітніх послуг на основі функціонально-вартісного аналізу, розробку системи центрів відповідальності з чітким розмежуванням повноважень та зон відповідальності представників різних партнерів, формування збалансованої системи показників, що відображають прогрес у досягненні стратегічних цілей партнерства. Інтеграція управлінського обліку з системами стратегічного та оперативного планування дозволить забезпечити зворотний зв'язок між плануванням та виконанням і своєчасно коригувати траєкторію розвитку партнерських проектів у відповідь на зміни зовнішнього середовища.

Висновки

Проведене дослідження дало змогу узагальнити ключові методологічні й організаційні параметри обліково-аналітичного забезпечення ДПП в умовах фінансування високовитратних спеціальностей та виявити системні суперечності, що ускладнюють формування достовірної, релевантної та управлінсько орієнтованої інформації. У роботі окреслено специфіку обліку витрат у сфері ресурсомістких освітніх програм, визначено аналітичні інструменти, здатні забезпечити більш точну оцінку партнерських моделей, а також висвітлено роль цифрових засобів у побудові прозорих і відтворюваних інформаційних потоків.

Отримані результати свідчать, що підвищення ефективності ДПП у фінансуванні підготовки фахівців значною мірою залежить від узгодженості облікових процедур, удосконалення нормативно-правового поля та розвитку інтегрованих підходів до управлінської аналітики. Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні уніфікованих методик вартісного оцінювання внесків партнерів, формуванні моделей інтегрованої звітності для ЗВО та створенні цифрових платформ, які забезпечать повну прозорість операцій у межах державно-приватної взаємодії.

Список використаної літератури

1. Гладких Д. М., Малафеева К. Ю. Ключові проблеми фінансування закладів вищої освіти в Україні та напрями їх вирішення. *Бізнес Інформ*. 2025. № 4. С. 150-159.
2. Кириленко О., Малиняк Б. Видатки Державного бюджету України на вищу освіту в світлі запровадження середньострокового планування. *Вісник економіки*. 2022. Вип. 3. С. 152–168. DOI: <https://doi.org/10.35774/visnyk2022.03.152>
3. Лисяк Л. В., Петрова Я. І., Цюп'як П. Р. Фінансове забезпечення вищої освіти в Україні: стан та напрями удосконалення. *Ефективна економіка*. 2020. № 12. – URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=8446>. DOI: 10.32702/2307-2105-2020.12.15
4. Малін О.Л. Аналіз розвитку державно-приватного партнерства в Україні та світі: якісні зміни та головні тренди 2020 року : Аналітичний звіт. Одеса, 2020. 31 с. URL : https://economics.net.ua/files/analytics/2020_MOL.pdf
5. Мельник Л. В., Кондрацька Н. М., Мельник Л. М. Проблеми фінансування вищої освіти в умовах сьогодення. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2024. № 4. С. 177-189.

6. Натрошвілі Г.Р. Фінансово-економічна підтримка розвитку закладів вищої освіти *Modern Science – Moderní věda*. 2020. № 7. URL : https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/16346/1/Natroshvili_G_7.pdf
7. Скрипник А. В., Негрей М. В., Петренко А. О. Аналіз попиту на освітні послуги ЗВО в розрізі окремих спеціальностей БІЗНЕС ІНФОРМ № 2-2021. (с. 111 – 118) DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2021-2-111-118>
8. Тимчак В. В., Тимчак М. В. Фінансова автономія закладів вищої освіти: адміністративно-правові межі та можливості. Аналітично-порівняльне правознавство. 2025. № 2. С. 720-725.
9. Чернега, В. Фінансове забезпечення закладів вищої освіти як інструмент соціально-економічного розвитку країни. *Економіка та суспільство*, 2023 № 47. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-47-81>
10. Шуст О.А., Гринчук Ю.С., Рибак Н.О. Моделі фінансування діяльності закладів вищої освіти. *Економіка та управління АПК*. 2021. № 2. С. 119–129. URL: <https://econommeneg.btsau.edu.ua/uk/content/modeli-finansuvannya-diyalnosti-zakladiv-vyshchoyi-osvity>
11. Юрчишена Л. В. Модель фінансування вищої освіти: поняття та практичні результати впровадження в Україні *Освітня аналітика України* 2021 № 3 (14) URL: https://science.iea.gov.ua/wp-content/uploads/2022/01/2_Yurchishena_314_2021_17_32.pdf
12. Юрчишена Л. В. Оцінка фінансової гнучкості закладів вищої освіти. Наукові записки Національного університету "Острозька академія". 2024. № 33. С. 81-86. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nznuoa_2024_33_12.
13. Moss Antony (2023) Funding the Higher Education Sector: More funding, with wiser spending. The Higher Education Policy Institute/ URL : <https://www.hepi.ac.uk/2023/12/11/funding-the-higher-education-sector-more-funding-with-wiser-spending/>

References

1. Hladkykh D. M., Malafeieva K. Yu. (2025) Kliuchovi problemy finansuvannya zakladiv vyshchoi osvity v Ukraini ta napriamy yikh vyrishennia. [Key problems of financing higher education institutions in Ukraine and ways to solve them.] *Biznes Inform*. № 4. С. 150-159.
2. Kyrylenko O., Malyniak B. (2022) Vydatky Derzhavnogo biudzhetu Ukrainy na vyshu osvitu v svitli zaprovadzhennia serednostrokovoho planuvannia. [State budget expenditure on higher education in light of the introduction of medium-term planning] *Visnyk ekonomiky*. Vyp. 3. p. 152–168. DOI: <https://doi.org/10.35774/visnyk2022.03.152>
3. Lysiak L. V., Petrova Ya. I., Tsiupiak P. R. (2020) Finansove zabezpechennia vyshchoi osvity v Ukraini: stan ta napriamy udoskonalennia. [Financial support for higher education in Ukraine: current situation and areas for improvement.] *Efektivna ekonomika*. № 12. – URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=8446>. DOI: 10.32702/2307-2105-2020.12.15
4. Malin O.L. (2020) Analiz rozvytku derzhavno-privatnoho partnerstva v Ukraini ta sviti: yakisni zminy ta holovni trendy 2020 roku [Analysis of the development of public-private partnerships in Ukraine and worldwide: qualitative changes and key trends in 2020]: *Analitychnyi zvit*. Odesa. 31 p. URL : https://economics.net.ua/files/analytics/2020_MOL.pdf
5. Melnyk L. V., Kondratska N. M., Melnyk L. M. (2024) Problemy finansuvannia vyshchoi osvity v umovakh sohodennia. [Problems of financing higher education in today's conditions] *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia*. № 4. P. 177-189.
6. Natroshvili H.R (2020) Finansovo-ekonomichna pidtrymka rozvytku zakladiv vyshchoi osvity. [Financial and economic support for the development of higher education institutions] *Modern Science – Moderní věda*. № 7. URL : https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/16346/1/Natroshvili_G_7.pdf
7. Skrypnyk A. V., Nehrei M. V., Petrenko A. O. (2021) Analiz popytu na osvितni posluhy ZVO v rozrizi okremykh spetsialnostei [Analysis of demand for higher education services by specific specialisations] *Biznes Inform* № 2. P. 111 – 118. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2021-2-111-118>
8. Tymchak V. V., Tymchak M. V. (2025) Finansova avtonomiia zakladiv vyshchoi osvity: administratyvno-pravovi mezhi ta mozhlyvosti [Financial autonomy of higher education institutions: administrative and legal limits and opportunities]. *Analitychno-porivnialne pravoznavstvo*. № 2. P. 720-725.
9. Cherneha, V. (2023). Finansove zabezpechennia zakladiv vyshchoi osvity yak instrument sotsialno-ekonomichnoho rozvytku krainy [Financial support for higher education institutions as a tool for the country's socio-economic development.]. *Економіка та суспільство*, № 47. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-47-81>
10. Shust O.A., Hrynychuk Yu.S., Rybak N.O. (2021) Modeli finansuvannia diialnosti zakladiv vyshchoi osvity [Models for financing higher education institutions]. *Економіка та управління АПК*. № 2. S. 119–129 URL: <https://econommeneg.btsau.edu.ua/uk/content/modeli-finansuvannya-diyalnosti-zakladiv-vyshchoyi-osvity>
11. Yurchyshena L. V. (2021) Model finansuvannia vyshchoi osvity: poniattia ta praktychni rezultaty vprovadzhennia v Ukraini [Higher education funding model: concept and practical results of implementation in Ukraine] *Osvitnia analityka Ukrainy* № 3 (14) URL: https://science.iea.gov.ua/wp-content/uploads/2022/01/2_Yurchishena_314_2021_17_32.pdf

12. Yurchyshena L. V. (2024) Otsinka finansovoi hnuchkosti zakladiv vyshchoi osvity [Assessment of the financial flexibility of higher education institutions]. *Naukovi zapysky Natsionalnoho universytetu "Ostrozka akademiia"*. № 33. P. 81-86. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nznuoa_2024_33_12.

13. Moss Antony (2023) Funding the Higher Education Sector: More funding, with wiser spending. *The Higher Education Policy Institute*. URL : <https://www.hepi.ac.uk/2023/12/11/funding-the-higher-education-sector-more-funding-with-wiser-spending/>

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 16.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

Л. П. СІДЕЛЬНИКОВА

доктор економічних наук, професор,
завідувач кафедри фінансів, обліку та оподаткування
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-7182-2923

О. М. ПОСАДНЄВА

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри фінансів, обліку та оподаткування
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8721-5124

АРХІТЕКТОНІКА ФІНАНСОВОГО ПОТЕНЦІАЛУ ДЕРЖАВИ В УМОВАХ СУЧАСНИХ ВИКЛИКІВ БЕЗПЕКОВОГО СЕРЕДОВИЩА

У статті досліджено теоретико-методологічні засади формування фінансового потенціалу держави як ключової передумови забезпечення економічної стійкості та фінансової безпеки в контексті сучасних викликів безпекового середовища. Розкрито архітектонику фінансового потенціалу, визначено його структурні елементи – бюджетні ресурси, державний борг, золотовалютні резерви та інвестиційний потенціал, а також охарактеризовано їх взаємозв'язок із фінансовою безпекою держави. Здійснено моніторинг доходів і видатків Зведеного бюджету України, досліджено динаміку державного боргу та золотовалютних резервів. Проаналізовано вплив трансформаційних процесів у публічних фінансах на здатність держави мобілізувати ресурси для підтримання макроекономічної стабільності та реалізації пріоритетів розвитку. За результатами аналізу виявлено суттєві зміни у структурі бюджетних доходів, видатків і боргу, зумовлені воєнними, економічними та інституційними чинниками. Доведено, що повномасштабна війна спричинила скорочення податкової бази, зростання частки зовнішніх трансфертів і боргового навантаження, внаслідок чого обмежується фінансова спроможність держави та посилюється її залежність від міжнародної допомоги і кредитної підтримки партнерів. Обґрунтовано взаємозалежність між рівнем фінансового потенціалу та фінансовою безпекою, їхню синергію у забезпеченні стійкості фінансової системи та відновлювального розвитку економіки. Запропоновано концептуальний підхід до розширення архітектури фінансової безпеки через інтеграцію інструментів нарощування фінансового потенціалу. Визначено основні напрями посилення фінансового потенціалу: удосконалення бюджетної політики, оптимізація боргового навантаження, підвищення ефективності використання фінансових ресурсів, розвиток ринку капіталу та поглиблення прозорості управління публічними фінансами. Сформульовано практичні рекомендації щодо вдосконалення механізмів управління публічними фінансами, спрямованих на зміцнення фінансового потенціалу, мінімізацію ризиків і забезпечення довгострокової стійкості економічної системи.

Ключові слова: фінансова безпека, публічні фінанси, фінансовий потенціал, бюджетні ресурси, державний борг, золотовалютні резерви, міжнародна фінансова допомога.

L. P. SIDELNYKOVA

Doctor of Economics, Professor,
Head of the Department of Finance, Accounting and Taxation
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-7182-2923

O. M. POSADNIEVA

Candidate of Sciences (Economics), Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Finance, Accounting and Taxation
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8721-5124

ARCHITECTONICS OF THE STATE'S FINANCIAL POTENTIAL UNDER MODERN SECURITY CHALLENGES

The theoretical and methodological foundations for forming the financial potential of the state as a key prerequisite for ensuring economic stability and financial security in the context of modern security challenges are explored in this article. The architectonics of financial potential is revealed, its structural elements are identified – budgetary resources,

public debt, gold and foreign exchange reserves, and investment potential – and their interconnection with the financial security of the state is characterised. Monitoring of revenues and expenditures of the Consolidated Budget of Ukraine is carried out, and the dynamics of public debt and gold and foreign exchange reserves are studied. The impact of transformation processes in public finances on the state's ability to mobilise resources to maintain macroeconomic stability and implement development priorities is analysed. The analysis revealed significant changes in the structure of budget revenues, expenditures and debt caused by military, economic and institutional factors. It is proved that full-scale war has led to a reduction in the tax base, an increase in the share of external transfers and debt burden, thereby limiting the financial capacity of the state and increasing its dependence on international aid and credit support from partners. The interdependence between the level of financial potential and financial security, their synergy in ensuring the stability of the financial system and the sustainable development of the economy, is substantiated. A conceptual approach to expanding the architecture of financial security through the integration of instruments increasing financial potential is proposed. The main directions for enhancing financial potential are identified: improving budgetary policy, optimising debt burden, increasing the efficiency of financial resource use, developing the capital market and deepening the transparency of public finance management. Practical recommendations are formulated for improving public finance management mechanisms aimed at strengthening financial potential, minimising risks and ensuring the long-term sustainability of the economic system.

Key words: *financial security, public finances, financial potential, budgetary resources, public debt, gold and foreign exchange reserves, international financial assistance.*

Постановка проблеми

Фундаментальною основою ресурсного забезпечення національної економіки є фінансовий потенціал держави. Його роль як вирішального чинника імплементації стратегій сталого розвитку домінує в сучасній парадигмі управління. Це поняття виходить за межі простого агрегування наявних фінансових ресурсів (грошових потоків та накопичень), репрезентуючи інституційну якість і системну здатність держави ефективно здійснювати їх мобілізацію, раціональний розподіл та цільове використання для вирішення пріоритетних завдань національного розвитку.

Для України, яка зіткнулася з безпрецедентними викликами військової агресії, питання формування та ефективного використання фінансового потенціалу набуває особливої гостроти. Повномасштабна війна, енергетична криза та глобальні економічні виклики вимагають інноваційних підходів до управління публічними фінансами, спрямованих не лише на забезпечення виживання держави, а й на створення передумов для її повоєнного відновлення та сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Теоретичний базис фінансового потенціалу держави сформований на засадах класичних теорій публічних фінансів та сучасної макроекономічної думки, що аналізує роль держави у мобілізації та розподілі ресурсів. В цьому контексті варто виокремити праці Р. А. Масгрейва, Дж. Стігліца, В. Танзі, Д. Ачемоглу, К. Райнхарта, К. Рогоффа, які з різних наукових парадигм розкривають архітектуру фінансового потенціалу, акцентуючи увагу на його ключових елементах: ефективності оподаткування, сталості державного боргу та якості фінансових інститутів. Теоретико-методологічні засади нарощування фінансового потенціалу та практичні аспекти його реалізації в контексті забезпечення економічної стійкості на мікро- та мезорівнях ґрунтовно досліджувалися і у працях провідних вітчизняних науковців. Причому найбільш поширеними у визначенні фінансового потенціалу є такі підходи: ресурсний (Г. Возняк, В. Свірський, Ю. Булатова), комбінований (С. Шумська, С. Фролов, О. Козьменко, А. Бойко) та екстремальний (В. Павлов, А. Ахмедов, Ж. Голодова). Окрему увагу дослідники приділяють взаємозв'язку фінансового потенціалу з фінансовою безпекою держави (І. Школьник, С. Козьменко, К. Захожай, Н. Рудик, Т. Жибер). Разом з тим, у вітчизняній науковій думці здебільшого досліджуються фінансові потенціали регіонів та фінансові потенціали підприємств, у той час як визначенню фінансового потенціалу держави не приділено значної уваги.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є ідентифікація структурних елементів фінансового потенціалу держави і розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності мобілізації та використання фінансових ресурсів в умовах сучасних викликів безпекового середовища.

Викладення основного матеріалу дослідження

У контексті глобальної економічної турбулентності, зростання геополітичних ризиків та необхідності забезпечення стійкості національних систем, питання ефективного формування та використання фінансового потенціалу держави набуває особливої актуальності. Здатність уряду мобілізувати, розподіляти та цілеспрямовано використовувати фінансові ресурси визначає не лише поточну економічну стабільність, але й довгострокову безпекову стійкість, особливо в умовах гібридних загроз та новітніх викликів безпекового середовища. Саме тому дослідження архітектури фінансового потенціалу, його адаптаційних механізмів і шляхів нарощування є ключовим імперативом сучасної економічної науки.

Хоча поняття фінансового потенціалу держави активно використовується в економічній науці, єдиний підхід до його трактування досі відсутній, що створює методологічні прогалини. Більшість класичних визначень, сформульованих на статичному обліку наявних ресурсів (бюджетних надходжень, резервів), не враховують динамічний, інституційний та адаптивний компоненти, які є вирішальними для забезпечення сталого розвитку та економічної безпеки. Це вимагає розробки комплексного визначення, яке б об'єднувало ресурсну базу, інституційну спроможність та потенціал до генерації нових фінансових можливостей.

На нашу думку, фінансовий потенціал держави – це комплексне поняття, що охоплює сукупність наявних та потенційно доступних фінансових ресурсів, а також механізми і можливості їх мобілізації та ефективного використання для забезпечення функціонування економіки і досягнення стратегічних цілей розвитку. Це не лише статичний запас ресурсів, але й динамічна здатність фінансової системи адаптуватися до змін та генерувати нові можливості.

Виходячи з визначення, ключовими результатами ефективного використання фінансового потенціалу є:

1. Формування ресурсів – повна мобілізація фінансових ресурсів через податкову систему, державні запозичення і управління державними активами.
2. Ефективний розподіл – цільове спрямування коштів відповідно до пріоритетів сталого розвитку та національних інтересів.
3. Сталий розвиток – досягнення економічного зростання з одночасним забезпеченням соціальної справедливості та екологічної безпеки.

Безпосередній зв'язок між фінансовим потенціалом та Цілями сталого розвитку ООН (SDGs) проявляється через забезпечення ресурсної бази для подолання бідності, розвитку інфраструктури, інвестування в освіту і охорону здоров'я, захисту довкілля та інших критичних напрямів [1]. Без належного фінансового потенціалу реалізація цих цілей залишається декларативною.

На рис. 1 представлено основні складові фінансового потенціалу держави, серед яких:

1. Бюджетні ресурси – доходи та видатки державного й місцевих бюджетів, що формують базу фінансової спроможності держави.
2. Державний борг – внутрішні та зовнішні запозичення як інструмент розширення фінансових можливостей держави.
3. Золотовалютні резерви – резервні активи, що забезпечують стабільність національної валюти та стійкість фінансової системи.
4. Інвестиційний потенціал – спроможність залучати та ефективно використовувати інвестиційні ресурси для економічного розвитку.

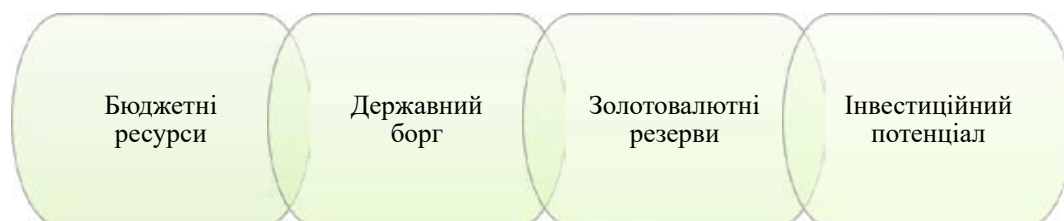


Рис. 1. Складові фінансового потенціалу держави

Джерело: складено авторами самостійно

Водночас, вагомий вплив на фінансовий потенціал здійснює фінансова безпека – стан захищеності фінансових інтересів на всіх рівнях фінансових відносин [2]. Саме взаємодія всіх компонентів фінансового потенціалу забезпечує синергетичний ефект, який дозволяє державі ефективно реалізовувати стратегії сталого розвитку навіть в умовах нестабільності.

Фінансова безпека держави та її фінансовий потенціал перебувають у тісному взаємозв'язку, формуючи основу для сталого розвитку економіки. Дослідження, проведені І. Школьник та С. Козьменком, демонструють, що високий фінансовий потенціал створює буфер проти зовнішніх і внутрішніх шоків, підвищуючи стійкість фінансової системи та її здатність підтримувати стабільне економічне зростання [3]. На думку К. Захожай, Н. Рудик і Т. Жибер, «дотримання фінансової стабільності – одна із найважливіших умов реалізації потенціалу держави у сучасному світі. Країни з більш розвинутою фінансовою системою мають тенденцію зростати і розвиватися швидшими темпами, не хтуючи питаннями національної безпеки. ... Фінансова безпека є необхідною умовою, що дозволяє досягати інших важливих громадських та політичних цілей, які є важливими для держави та населення. Оскільки дотримання національної безпеки є першочерговою задачею для України, вона є необхідною умовою у контексті досягнення основних її завдань» [4].

Наведені наукові підходи демонструють синергію між фінансовим потенціалом (як ресурсною базою і мобілізаційною спроможністю) та фінансовою безпекою (як станом захищеності і стійкості). Високий потенціал є не лише наслідком, а й передумовою та ключовим механізмом забезпечення стійкості національної фінансової системи в умовах глобальних, регіональних та внутрішніх загроз. Без наявності достатнього фінансового потенціалу неможливе ефективне функціонування критично важливих секторів, що прямо впливає на обороноздатність та соціально-економічну стабільність держави.

Враховуючи виклики безпекового середовища та необхідність системного нарощування фінансової стійкості України, ми вважаємо за доцільне розширити традиційне розуміння фінансової безпеки, включивши до її архітектури ключові складові, які безпосередньо підвищують фінансовий потенціал. Такий підхід дозволяє перейти від пасивної функції захисту до активної функції формування та розвитку потенціалу, що відображено на рис. 2.

<p>Бюджетна стабільність</p>	<p>Збалансованість бюджету, оптимальний рівень дефіциту та ефективна система міжбюджетних трансфертів формують основу фінансової безпеки. Достатній фінансовий потенціал дозволяє державі підтримувати необхідний рівень видатків навіть у періоди економічного спаду</p>
<p>Управління зовнішнім боргом</p>	<p>Надмірне боргове навантаження становить критичну загрозу для фінансової безпеки. Розвинений фінансовий потенціал дозволяє оптимізувати структуру державного боргу та забезпечити його обслуговування без надмірного тиску на бюджет</p>
<p>Стабільність національної валюти</p>	<p>Курсова стабільність є важливим індикатором фінансової безпеки. Достатні золотовалютні резерви як складова фінансового потенціалу забезпечують здатність центрального банку проводити ефективну валютну політику</p>

Рис. 2. Складові фінансової безпеки держави, які підвищують її фінансовий потенціал

Джерело: складено авторами самостійно

Серед ключових ризиків та загроз, що впливають на фінансовий потенціал України, особливо гостро постають проблеми, пов'язані з російською військовою агресією: руйнування критичної інфраструктури, втрата частини економічного потенціалу на тимчасово окупованих територіях, зростання оборонних видатків, вимушена міграція населення. Додатковими викликами є інфляційний тиск та нестабільність валютного ринку.

В сучасних умовах критично важливим для фінансової безпеки України є зменшення залежності від зовнішнього фінансування при одночасному збереженні достатнього рівня міжнародної підтримки для відновлення економіки. Такий баланс вимагає стратегічного підходу до формування та використання фінансового потенціалу держави.

Центральним елементом фінансового потенціалу є бюджетні ресурси, оскільки їхня оптимальна мобілізація і раціональний розподіл відображають здатність держави ефективно використовувати наявні кошти для виконання своїх функцій та забезпечення сталого розвитку. Структура та динаміка доходів і видатків зведеного бюджету слугують ключовим індикатором фінансових можливостей країни та пріоритетів її економічної політики.

Оцінимо зміни, які відбулися у структурі та динаміці бюджетних доходів за останні 4 роки (табл. 1).

Як свідчать дані таблиці 1, структура доходів зведеного бюджету в період 2021-2024 років зазнала суттєвих трансформацій.

Так, питома вага податкових надходжень скоротилася з 87,46% у довоєнний період до 58,21% на третій рік повномасштабної війни. Зазначена редукція зумовлена низкою макроекономічних та деструктивних чинників, зокрема: тимчасовою окупацією територій із значним виробничим (а отже – і податковим) потенціалом, руйнуванням критичних підприємств, скороченням підприємницької активності, зменшенням кількості робочих місць внаслідок мобілізації і міграційних процесів.

Натомість частка коштів, які надходять до бюджету від Європейського Союзу, урядів іноземних держав, міжнародних організацій та донорських установ (трансферти), зростає з 0,08% у 2021 році до 13,25% у 2024 році. Загальне зростання обсягу фінансової допомоги від наших іноземних партнерів впродовж дії воєнного стану

перевищило 40 тис. разів. Це пов'язано з неспроможністю України забезпечити достатню наповненість бюджетів усіх рівнів через скорочення внутрішньої ресурсної бази, стрімке зростання видатків на безпеку та оборону і, як підсумок, критичний дефіцит коштів для фінансування першочергових потреб держави.

Таблиця 1

Структура та динаміка доходів Зведеного бюджету України у 2021-2024 роках

Показники	2021 рік		2022 рік		2023 рік		2024 рік		Тпр 2024/2021, %
	Сума, млрд грн	Частка, %	Сума, млрд грн	Частка, %	Сума, млрд грн	Частка, %	Сума, млрд грн	Частка, %	
Податкові надходження	1 453,8	87,46	1 343,2	61,16	1 638,1	52,77	2 088,3	58,21	+43,64
Неподаткові надходження	202,5	12,18	368,4	16,77	1 028,1	33,12	1 018,0	28,37	+402,72
Доходи від операцій з капіталом	3,8	0,23	2,9	0,13	3,7	0,12	5,0	0,14	+31,58
Трансферти	1,3	0,08	481,3	21,91	433,6	13,97	475,4	13,25	+36469,23
Цільові фонди	0,8	0,05	0,5	0,02	0,8	0,03	1,1	0,03	+37,50
Усього доходів	1 662,2	100,00	2 196,3	100,00	3 104,3	100,00	3 587,8	100,00	+115,85

Джерело: складено авторами за даними [5]

Структура видатків зведеного бюджету також значно змінилася (рис. 3).

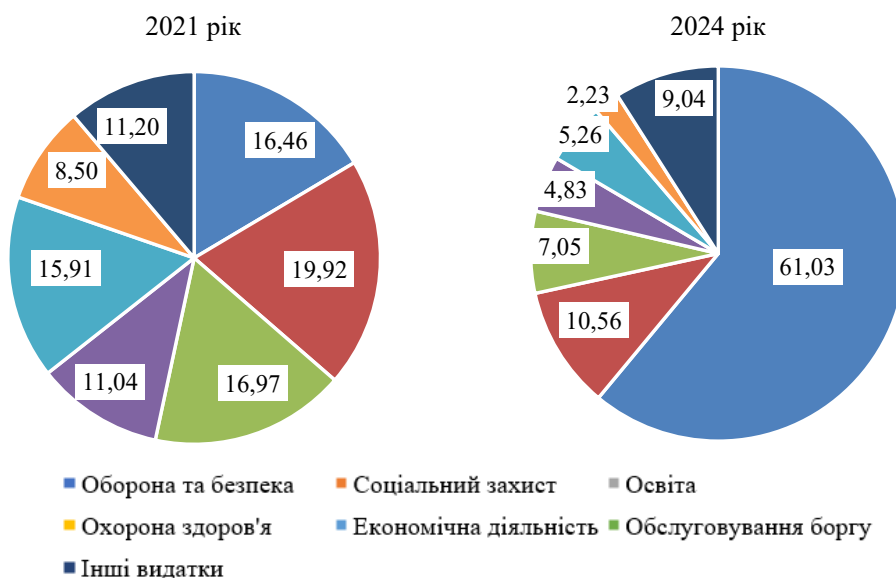


Рис. 3. Структура видатків Зведеного бюджету України у 2021 та 2024 роках

Джерело: складено авторами за даними [5]

Аналіз структури видаткової частини зведеного бюджету вказує на радикальну переорієнтацію фінансових пріоритетів держави у період 2021-2024 років. Так, впродовж останніх чотирьох років видатки на оборону зросли більше ніж у 18 разів (з 127,5 млрд грн у 2021 році до 2304,5 млрд грн у 2024 році). Натомість, спостерігається істотне зменшення питомої ваги видатків, спрямованих на соціально-економічний розвиток: зокрема, на освіту, охорону здоров'я та економічну діяльність. Хоча абсолютні номінальні обсяги фінансування цих галузей збільшилися, враховуючи кумулятивний рівень інфляції за звітний період, їхня реальна вартість фактично знизилася.

Структура видатків зведеного бюджету у 2024 році демонструє переважання витрат на сектор безпеки та оборони, що є наслідком воєнного стану та пріоритетів поточної політики. Висока частка соціальних видатків виконує стабілізаційну функцію, тоді як зростання витрат на обслуговування боргу підвищує бюджетну жорсткість і обмежує простір для розвитку. У цих умовах лімітуються інвестиції в людський капітал та інфраструктуру, що потребує середньострокового балансування видаткової політики з акцентом на відновлення, підвищення ефективності витрат та розширення доходної бази держави. Фіскальна політика безпосередньо впливає на мобілізацію фінансових ресурсів через встановлення податкових ставок, визначення пільг та преференцій, вдосконалення адміністрування податків. Ефективність цих механізмів визначає загальний обсяг доступних фінансових ресурсів та, відповідно, потенціал для фінансування пріоритетних напрямів розвитку.

В умовах війни та відновлення Україна стикається з беспрецедентними бюджетними викликами: значне зростання оборонних видатків, необхідність підтримки внутрішньо переміщених осіб, фінансування відбудови зруйнованої інфраструктури при одночасному скороченні податкової бази через скорочення економічної активності. Це вимагає інноваційних підходів до бюджетного планування та пошуку нових джерел наповнення бюджету, включаючи розширення міжнародної фінансової допомоги і запровадження спеціальних податкових інструментів.

Зрозуміло, що за таких обставин уряд вимушений активно позичати. Причому, внутрішні джерела фінансування бюджетного дефіциту в умовах воєнного стану є досить обмеженими, тому акцент робиться на зовнішніх державних запозиченнях [6, с. 299]. Зазначимо, що державні запозичення можуть бути інструментом розширення фінансових можливостей держави і збільшення її фінансового потенціалу, однак можуть відігравати і деструктивну роль та «вимивати» значні фінансові ресурси при їх погашенні.

За останні роки відбулося істотне зростання державного боргу України, та, як наслідок, обсягів його погашення (табл. 2).

Таблиця 2

Державний борг України та витрати з його погашення і обслуговування у 2021-2024 роках

Роки	Державний борг, млрд грн	Витрати з погашення та обслуговування державного боргу, млрд грн			Доходи ЗБУ, млрд грн	Питома вага витрат з погашення та обслуговування державного боргу у доходах ЗБУ, %
		погашення	обслуговування	усього		
2021	2 671,8	441,1	155,7	596,9	1 662,2	35,91
2022	4 071,7	448,6	157,9	606,4	2 196,3	27,61
2023	5 519,5	436,5	247,6	684,1	3 104,3	22,04
2024	6 981,0	1 109,6	307,4	1 417,0	3 587,8	39,49

Джерело: складено авторами за даними [5; 7; 8]

Як бачимо, у 2022 році спостерігається значне зростання обсягів державного боргу порівняно з 2021 роком у зв'язку з повномасштабним вторгненням РФ на територію України та необхідністю покриття значних бюджетних видатків на оборону. Тобто ці запозичення спрямовувались не на нарощування фінансового потенціалу, а на військові потреби.

Високе боргове навантаження суттєво обмежує фінансовий потенціал держави, критично звужуючи фінансовий простір для реалізації інвестиційних та соціально-економічних програм, оскільки значна частина акумульованих ресурсів спрямовується на обслуговування та погашення боргових зобов'язань. Таке істотне обмеження фінансової спроможності держави спостерігаємо у 2024 році через різке зростання боргових витрат. Отже, борговий чинник є одним з ключових детермінантів фінансової безпеки та фінансового потенціалу держави, оскільки визначає її спроможність мобілізувати й ефективно використовувати фінансові ресурси для забезпечення макроекономічної стійкості та сталого розвитку, і наразі його вплив є негативним. На жаль, подібна тенденція зберігатиметься і надалі, оскільки в умовах війни збільшується бюджетний дефіцит, який потребує покриття за рахунок нових запозичень [9, с. 321].

Золотовалютні резерви (далі – ЗВР) також є складовою фінансового потенціалу держави і відображають її здатність протистояти зовнішнім та внутрішнім шокам. ЗВР забезпечують можливість держави здійснювати міжнародні розрахунки, покривати дефіцит платіжного балансу і підтримувати стабільність гривні на валютному ринку, що є критично важливим для підтримки торговельних відносин з міжнародними партнерами та забезпечення безперервності економічних операцій, особливо під час війни. Вони також слугують потужним буфером у кризових ситуаціях, дозволяючи Національному банку України оперативного втручатися для згладжування валютних коливань і підтримки довіри інвесторів.

Зміна золотовалютних резервів України впродовж досліджуваного періоду відображена на рис. 4.

За даними рис. 4, золотовалютні резерви України здебільшого показують позитивну динаміку зростання, що свідчить про збільшення фінансового потенціалу країни за рахунок цієї складової. Негативна динаміка спостерігалася виключно у 2022 році – на початку повномасштабного вторгнення РФ. Наявність достатніх золотовалютних резервів істотно підвищує кредитний рейтинг країни на міжнародних ринках капіталу та сприяє активному залученню іноземних інвестицій. Це створює позитивний цикл економічного розвитку та зміцнення фінансової системи держави, що буде відігравати значну роль під час повоєнного відновлення країни.

В умовах посилення глобалізаційних процесів і поглиблення міжнародної інтеграції значну роль у формуванні та реалізації фінансового потенціалу України відіграють зовнішні чинники:

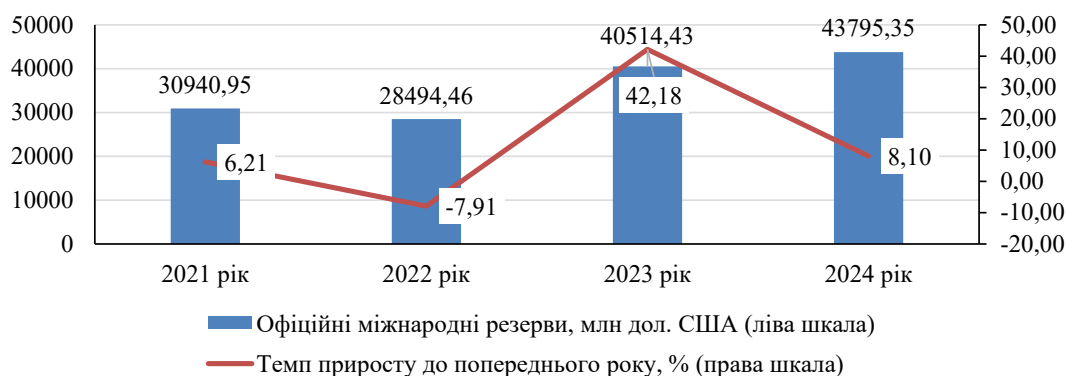


Рис. 4. Динаміка золотовалютних резервів України у 2021-2024 роках

Джерело: складено авторами за даними [10]

1. Міжнародна фінансова допомога. З початку повномасштабної війни Україна отримала безпрецедентну фінансову підтримку від міжнародних партнерів. За даними Міністерства фінансів України, загальний обсяг фінансової допомоги (грантової (безповоротної), макрофінансової, пільгових довгострокових кредитів, кредитних гарантій) від ЄС, урядів іноземних держав, міжнародних організацій, донорських установ у 2022-2025 роках перевищив 1 606 млрд грн [5].

2. Вплив глобальних фінансових ринків. Волатильність світових фінансових ринків безпосередньо впливає на фінансовий потенціал України через такі канали: зміни відсоткових ставок на міжнародних ринках, коливання курсів основних валют, динаміка цін на ключові експортні товари (зерно, метали), зміни настроїв інвесторів щодо ринків, що розвиваються.

Досвід України у залученні міжнародних фінансових ресурсів для розвитку демонструє як успіхи, так і виклики. З одного боку, Україна змогла мобілізувати безпрецедентний обсяг міжнародної підтримки для подолання наслідків війни; з іншого – існують ризики зростання боргового навантаження та формування «пастки залежності» від зовнішнього фінансування.

Ключовим завданням для України є поступовий перехід від екстреної фінансової допомоги до довгострокових інвестицій у відбудову та розвиток економіки. Це вимагає вдосконалення механізмів залучення і використання міжнародних фінансових ресурсів, підвищення прозорості та ефективності проєктів, що фінансуються за рахунок зовнішніх джерел, та розвитку внутрішнього фінансового ринку як альтернативного джерела фінансування.

Висновки

Формування і реалізація фінансового потенціалу України відбувається в умовах безпрецедентних викликів, пов'язаних з військовою агресією РФ, економічною нестабільністю та інституційними проблемами:

1. Військові виклики: колосальні витрати на оборону та безпеку (понад 60% видатків державного бюджету), руйнування критичної інфраструктури, втрата економічного потенціалу на тимчасово окупованих територіях, необхідність одночасного фінансування оборони та відбудови.

2. Економічні виклики: скорочення податкової бази внаслідок зниження темпів економічного зростання, високий рівень інфляції, обмежений доступ до міжнародних ринків капіталу, значне зростання державного боргу та витрат на його обслуговування.

3. Інституційні виклики: недосконалість нормативно-правової бази у фінансовій сфері, високі корупційні ризики та неефективність використання фінансових ресурсів, недостатній розвиток фінансового ринку і обмежений доступ до фінансування, слабкість механізмів контролю та моніторингу використання фінансових ресурсів.

Розуміння цих викликів і розробка ефективних стратегій їх подолання є необхідною умовою для забезпечення фінансової стійкості держави та її сталого розвитку. Причому найбільший виклик полягає не стільки в абсолютному обсязі необхідних ресурсів, скільки у здатності до їхнього результативного розподілу та цільового використання. Без реформування фінансової системи та суттєвого підвищення прозорості навіть значні обсяги міжнародної допомоги не зможуть забезпечити сталий розвиток країни.

Проблема дефіциту фінансових ресурсів та їх раціонального використання набула критичного значення в умовах війни, що актуалізує необхідність пошуку інноваційних механізмів фінансування та максимізації результативності використання кожної гривні. Стратегічне реформування фінансової системи України має бути спрямоване на підвищення її прозорості, ефективності і стійкості. Зокрема, ключовими напрямками реформ є вдосконалення бюджетного процесу, розвиток ринку капіталу, підвищення ефективності управління публічними фінансами, цифровізація фінансових послуг, посилення фінансового нагляду. Лише комплексна, системна та послідовна їх імплементація дозволить подолати існуючі структурні бар'єри та повною мірою реалізувати фінансовий потенціал України.

Список використаної літератури

1. UNDP provides recommendations to assist Ukraine in increasing funding for sustainable development (INFF). *UNDP*. URL : https://www.undp.org/ukraine/news/undp-provides-recommendations-assist-ukraine-increasing-funding-sustainable-development?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 01.11.2025).
2. Про затвердження Методичних рекомендацій щодо розрахунку рівня економічної безпеки України : Наказ Міністерства економічного розвитку і торгівлі України від 29.10.2013 р. № 1277. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1277731-13#Text> (дата звернення: 02.11.2025).
3. Shkolnyk I., Kozmenko S., Polach J., Wolanin E. State financial security: Comprehensive analysis of its impact factors. *Journal of International Studies*. 2020. № 13(2). URL : https://www.jois.eu/?618,en_state-financial-security-comprehensive-analysis-of-its-impact-factors (дата звернення: 02.11.2025).
4. Захожай К. В., Рудик Н. В., Жибер Т. В. Фінансова безпека держави: бюджетна складова та макроекономічні чинники. *Ефективна економіка*. 2023. № 11. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2023.11.39> (дата звернення: 02.11.2025).
5. Структура Зведеного бюджету України. *Open Budget*. URL : <https://openbudget.gov.ua/?month=12&year=2024&budgetType=CONSOLIDATED> (дата звернення: 03.11.2025).
6. Сідельникова Л.П. Сучасні виклики та новітні асиметрії фіскального простору держави. *Актуальні проблеми розвитку економіки регіону*. 2024. Вип. 20. Т. 1. С. 293-305. DOI: <https://doi.org/10.15330/apred.1.20.293-305>
7. Державний борг та гарантований державою борг. *Міністерство фінансів України*. URL : https://mof.gov.ua/uk/derzhavnij-borg-ta-garantovaniy-derzhavju-borg_osn_inf (дата звернення: 03.11.2025).
8. Статистичний збірник Міністерства фінансів України. *Міністерство фінансів України*. URL : <https://mof.gov.ua/uk/statistichnij-zbirnik> (дата звернення: 03.11.2025).
9. Посаднева О.М., Березинська М.О. Вплив платежів за державним боргом на прогностичні показники бюджетної безпеки держави. *Актуальні проблеми розвитку економіки регіону*. 2024. Вип. 20. Т. 1. С. 318-327. DOI: <https://doi.org/10.15330/apred.1.20.318-327>
10. Золотовалютні резерви України. *Мінфін*. URL : <https://index.minfin.com.ua/ua/finance/assets/2021/> (дата звернення: 04.11.2025).

References

1. United Nations Development Programme (UNDP). (2025) UNDP provides recommendations to assist Ukraine in increasing funding for sustainable development (INFF). Available at: <https://www.undp.org/ukraine/news/undp-provides-recommendations-assist-ukraine-increasing-funding-sustainable-development> (accessed 1 November 2025).
2. Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine. (2013) Pro zatverdzhennia Metodychnykh rekomendatsii shchodo rozrakhunku rivnia ekonomichnoi bezpeky Ukrainy: Nakaz No. 1277 vid 29.10.2013 r. [On approval of the Methodological recommendations for calculating the level of economic security of Ukraine: Order No. 1277 of October 29, 2013]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1277731-13#Text> (accessed 2 November 2025).
3. Shkolnyk I., Kozmenko S., Polach J., Wolanin E. (2020) State financial security: Comprehensive analysis of its impact factors. *Journal of International Studies*, no. 13(2). Available at: https://www.jois.eu/?618,en_state-financial-security-comprehensive-analysis-of-its-impact-factors (accessed November 2, 2025).
4. Zakhozhai K. V., Rudyk N. V., Zhyber T. V. (2023) Finansova bezpeka derzhavy: biudzhetna skladova ta makroekonomichni chynnyky [Financial security of the state: Budgetary component and macroeconomic factors]. *Efektivna ekonomika*, no. 11. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2023.11.39> (accessed November 2, 2025).
5. Open Budget. (2025) Struktura Zvedenoho biudzhetu Ukrainy [Structure of the Consolidated Budget of Ukraine], Available at: <https://openbudget.gov.ua/?month=12&year=2024&budgetType=CONSOLIDATED> (accessed November 3, 2025).
6. Sidelnikova L. P. (2024) Suchasni vyklyky ta novitni asymetrii fiskalnoho prostoru derzhavy [Modern challenges and the latest asymmetries in the fiscal space of the state]. *Aktualni problemy rozvytku ekonomiky rehionu*, no. 20, pp. 293-305. DOI: <https://doi.org/10.15330/apred.1.20.318-327>.
7. Ministry of Finance of Ukraine. (2025) Derzhavnii borh ta harantovani derzhavoiu borh [Public debt and state-guaranteed debt]. Available at: https://mof.gov.ua/uk/derzhavnij-borg-ta-garantovaniy-derzhavju-borg_osn_inf (accessed November 3, 2025).
8. Ministry of Finance of Ukraine. (2025) Statystychnyi zbirnyk Ministerstva finansiv Ukrainy [Statistical collection of the Ministry of Finance of Ukraine]. Available at: <https://mof.gov.ua/uk/statistichnij-zbirnik> (accessed November 3, 2025).
9. Posadnieva O. M., Berezyńska M. O. (2024) Vplyv platezhiv za derzhavnym borhom na prohnozni pokaznyky biudzhetnoi bezpeky derzhavy [Impact of public debt payments on forecast indicators of the state's budget security]. *Aktualni problemy rozvytku ekonomiky rehionu*, no. 20, pp. 318-327. DOI: <https://doi.org/10.15330/apred.1.20.318-327>.
10. Minfin. (2025) Zolotovaliutni rezervy Ukrainy [Foreign exchange reserves of Ukraine]. Available at: <https://index.minfin.com.ua/ua/finance/assets/2021/> (accessed November 4, 2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

Ю. О. СОКОЛОВА

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри маркетингу та логістики
Національний університет «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0003-1352-0147

Н. М. ПАВЛІШИНА

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри маркетингу та логістики
Національний університет «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0001-7715-9202

ЗАСТОСУВАННЯ АІ-ІНСТРУМЕНТІВ У СИСТЕМІ МАРКЕТИНГОВИХ КОМУНІКАЦІЙ В2В-РИНКУ

У статті досліджено застосування інструментів штучного інтелекту як ключового напрямку модернізації системи маркетингових комунікацій промислових підприємств на сучасному етапі цифрової трансформації економіки. Обґрунтовано, що АІ-технології виступають не лише засобом автоматизації окремих операцій, а й драйвером формування нової комунікаційної парадигми, орієнтованої на аналітичну обґрунтованість, персоналізацію, прискорення обробки даних та формування високого рівня взаємодії між суб'єктами В2В-середовища. У межах дослідження проаналізовано функціональні можливості ключових АІ-інструментів: алгоритмів машинного навчання, технологій обробки природної мови, генеративних моделей та прогнозно-аналітики, визначено їхню роль у формуванні ефективних комунікацій підприємств. Особливу увагу приділено практичним аспектам використання АІ у промисловому секторі: автоматизації первинних контактів із клієнтами, створенню інтелектуального технічного контенту, підвищенню точності лідогенерації та оптимізації рекламних і PR-комунікацій.

Представлений емпіричний аналіз демонструє, що інтеграція АІ сприяє зростанню швидкості реакції на запити, підвищенню точності персоналізації, скороченню маркетингових витрат та збільшенню конверсії у запити й комерційні пропозиції, що підтверджує стратегічний характер застосування АІ у системі В2В-комунікацій. Проаналізовано ризики впровадження штучного інтелекту, серед яких технічні обмеження інтеграції, етичні та юридичні проблеми захисту даних, а також організаційні бар'єри, пов'язані з цифровою компетентністю персоналу. Визначено перспективні напрями подальших досліджень: розроблення моделей оцінювання ефективності АІ-комунікацій у В2В-секторі, формування галузевих стандартів безпеки даних, інтеграція АІ у стратегічне управління клієнтським досвідом та адаптація АІ-рішень до вимог промислових екосистем.

Ключові слова: штучний інтелект, В2В-маркетинг, маркетингові комунікації, машинне навчання, NLP, цифрова трансформація.

YU. O. SOKOLOVA

PhD in Economics, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Marketing and Logistics
National University "Zaporizhzhia Polytechnic"
ORCID: 0000-0003-1352-0147

N. M. PAVLISHYNA

PhD in Economics, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Marketing and Logistics
National University "Zaporizhzhia Polytechnic"
ORCID: 0000-0001-7715-9202

APPLICATION OF AI TOOLS IN THE B2B MARKETING COMMUNICATION SYSTEM

The article examines the application of artificial intelligence tools as a key direction for modernizing the marketing communication systems of industrial enterprises amid the ongoing digital transformation of the economy. It is substantiated that AI technologies serve not only as instruments for automating individual operations but also as drivers of a new communication paradigm oriented toward data-driven decision-making, personalization, accelerated

information processing, and enhanced interaction between B2B market participants. The study analyzes the functional capabilities of core AI instruments – including machine learning algorithms, natural language processing technologies, generative models, and predictive analytics – and identifies their role in strengthening the effectiveness of enterprise-level communication processes. Particular attention is paid to practical aspects of AI implementation in the industrial sector, such as the automation of initial client interactions, the creation of intelligent technical content, improved lead-generation accuracy, and the optimization of advertising and PR communications.

The empirical analysis presented demonstrates that AI integration contributes to faster response times, higher personalization accuracy, reduced marketing costs, and increased conversion rates into inquiries and commercial proposals, thereby confirming the strategic significance of AI in B2B communication systems. The article also addresses implementation risks, including technical integration barriers, ethical and legal challenges related to data protection, and organizational constraints associated with insufficient digital competencies among staff. Prospective research directions are outlined, including the development of models for evaluating the effectiveness of AI-driven communications in the B2B sector, the creation of industry-wide data security standards, the integration of AI into customer experience management, and the adaptation of AI solutions to the requirements of industrial ecosystems.

Key words: artificial intelligence, B2B marketing, marketing communications, machine learning, NLP, digital transformation.

Постановка проблеми

У сучасних умовах цифрової трансформації промислові підприємства стикаються з різким зростанням обсягів інформації, необхідної для забезпечення ефективної взаємодії між суб'єктами B2B-ринку. Зміни у структурі попиту, прискорення циклу ухвалення рішень, необхідність оперативної аналітики та персоналізованої комунікації ставлять перед компаніями нові виклики, які не можуть бути вирішені за допомогою традиційних маркетингових інструментів. Системи класичного маркетингового менеджменту часто не забезпечують потрібної швидкості обробки запитів, гнучкості у формуванні пропозицій та точності у прогнозуванні поведінки клієнтів.

Проблема ускладнюється тим, що B2B-комунікації мають технічно складний характер, охоплюють кількох стейкхолдерів одночасно та потребують значного обсягу обґрунтованої інформації на кожному етапі взаємодії. У таких умовах підприємства потребують інструментів, здатних забезпечити не лише швидку обробку даних, а й інтелектуальний супровід комунікаційних процесів.

Штучний інтелект відкриває можливості для якісного оновлення маркетингових комунікацій, однак його впровадження у промисловому секторі пов'язане з низкою суперечностей: недостатньою готовністю підприємств до цифровізації, відсутністю стратегій інтеграції AI у комунікаційні процеси, ризиками, пов'язаними з достовірністю даних та алгоритмічними помилками. Тому актуальною є проблема визначення реальних можливостей, переваг і обмежень застосування AI-інструментів у системі маркетингових комунікацій B2B-ринку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження цифрових маркетингових комунікацій та ролі штучного інтелекту в управлінні взаємодією з ринком активно розвиваються у вітчизняній науковій площині. Українські автори звертають увагу на те, що поступова автоматизація комунікаційних процесів, удосконалення технологій збору даних та зростання складності клієнтських маршрутів істотно змінюють підходи до управління комунікаціями як у B2C-, так і у B2B-секторах [1-4, 7, 8, 11, 12, 14].

Серед українських науковців, які досліджують використання штучного інтелекту в маркетингових комунікаціях B2B сектора слід відзначити роботи

Буга Н., Огречук А. [1], які розглядають цифрові канали комунікації як основу побудови інтерактивного діалогу зі споживачами; Лядського І.К., Шульги Л.В., Кушніренко М.О. [8], які досліджують процеси синхронізації емоційних, технологічних та інформаційних компонент маркетингової комунікаційної стратегії. В роботах [6, 8, 9, 10, 13], присвячених застосуванню AI-інструментів у персоналізованій рекламі, зазначено, що алгоритми машинного навчання забезпечують глибший аналіз поведінкових характеристик споживачів, дозволяючи моделювати індивідуальні сценарії взаємодії та прогнозувати реакцію аудиторії на різні типи контенту. Персоналізовані комунікації на основі AI підвищують точність таргетингу, мінімізують небажані витрати та сприяють зміцненню довіри до бренду. Застосування штучного інтелекту розглядається як ключовий інструмент підвищення гнучкості та адаптивності комунікаційних стратегій, адже AI дозволяє швидко інтерпретувати великі масиви даних, прогнозувати попит та формувати релевантні повідомлення для різних сегментів цільової аудиторії.

Підтвердженням глобальності цих тенденцій є класичні та сучасні теоретичні напрацювання. Зокрема, Ф. Котлер [5, 15] у своїх працях приділяє значну увагу інтегрованим маркетинговим комунікаціям, які передбачають узгодженість інструментів і повідомлень для досягнення системного впливу на аудиторію. Ідеї Ф. Котлера знаходять логічне продовження в концепції Індустрії 5.0, що передбачає переосмислення ролі технологій у взаємодії людини й бізнесу. Індустрія 5.0 акцентує на людиноцентричності та взаємодоповнюваності людського та алгоритмічного інтелекту, що цілком відповідає розвитку AI-орієнтованих маркетингових комунікацій, де технології не замінюють людину, а підсилюють її аналітичні та управлінські можливості.

Узагальнюючи зміст опрацьованих джерел, можна стверджувати, що українські науковці формують ґрунтовну теоретичну базу для дослідження цифрових комунікацій, приділяючи увагу персоналізації, аналітичним платформам, омніканальності та AI-системам. Водночас виявляється наукова прогалина у дослідженні специфіки застосування цих технологій у B2B-сегменті, де комунікації мають більш структурований, технічно орієнтований і раціональний характер. Саме тому подальші дослідження мають бути спрямовані на розкриття потенціалу AI у побудові партнерських взаємин між промисловими підприємствами, оптимізації складних інформаційних потоків та формуванні клієнтського досвіду нового покоління у сфері B2B.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є комплексне дослідження можливостей, механізмів та ефективності застосування інструментів штучного інтелекту у системі маркетингових комунікацій B2B-ринку, визначення їх впливу на якість взаємодії між промисловими підприємствами та клієнтами, а також окреслення переваг, ризиків і перспектив інтеграції AI-технологій у комунікаційні стратегії промислового сектору.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розвиток штучного інтелекту докорінно змінює підходи до побудови маркетингових комунікацій, особливо в умовах B2B-ринку, де інформаційні потоки мають високий рівень структурованості, технічності та взаємозалежності між учасниками бізнес-процесів. На відміну від B2C-сегмента, де значна частина AI-рішень орієнтована на масову персоналізацію та роботу з поведінковими тригерами споживачів, у B2B комунікації виконують функцію інституційної взаємодії та ґрунтуються на раціональних аргументах, доказовості та складних техніко-економічних обґрунтуваннях. Саме тому використання AI у цьому середовищі набуває не просто характеру підтримки комунікацій, а трансформується у стратегічний інструмент управління міжфірмовими відносинами.

Штучний інтелект у маркетингу доцільно визначати як інтегровану систему алгоритмів, методів аналізу та обчислювальних моделей, здатних автономно або напівавтономно обробляти дані, синтезувати інформацію, формувати адаптовані комунікаційні повідомлення та прогнозувати реакцію цільових груп. Центральним елементом AI-технологій є здатність до самоудосконалення через накопичення та інтерпретацію великих масивів даних, що дозволяє суттєво підвищити точність і релевантність інформації, переданої клієнтам.

У межах B2B-комунікацій інструменти AI виконують як функціональні, так і аналітичні завдання: допомагають оптимізувати інформаційні процеси, прискорюють підготовку технічних матеріалів, розширюють можливість глибокої сегментації та забезпечують високий рівень адаптації контенту до потреб конкретних груп стейкхолдерів. До базових технологічних напрямів, що формують основу AI у комунікаціях промислового сектору, належать: машинне навчання, обробка природної мови, генеративні моделі та прогнозна аналітика.

Основою використання AI в маркетингових комунікаціях промислових підприємств є:

– алгоритми машинного навчання – забезпечують здатність систем штучного інтелекту виявляти приховані закономірності у поведінці клієнтів та обробляти складні, багатовимірні дані. У B2B-середовищі ML-моделі застосовуються для розв'язання таких ключових завдань: формування поведінкових профілів корпоративних клієнтів на основі історії закупівель, структури запитів та інтенсивності комунікацій, визначення потенційної готовності контрагента до укладення угоди шляхом розрахунку інтегральних індексів інтересу, оптимізація каналів взаємодії шляхом аналізу продуктивності контактних точок та оцінювання їхнього впливу на кінцеве рішення;

– обробка природної мови технологіями NLP, що забезпечують машинну інтерпретацію текстової інформації та формування змістовно релевантних відповідей. У B2B-комунікаціях застосування NLP особливо важливе з огляду на специфіку галузевої термінології та складність технічної документації. Інструменти NLP дають змогу: автоматизувати первинну обробку технічних запитів і розподіляти їх між відповідальними підрозділами, генерувати попередні відповіді менеджерам із продажу, враховуючи контекст запиту й історію взаємодії, аналізувати зміст переговорів, технічних специфікацій і комерційних пропозицій на предмет відповідності вимогам клієнта. Таким чином, NLP сприяє підвищенню точності комунікацій та зменшенню ризику помилок у процесі передавання складної технічної інформації, що є критичним для промислових підприємств;

– генеративні моделі – GPT, Claude, Midjourney, DALL-E тощо відкривають можливість створення високоадаптованого контенту, який враховує особливості цільових аудиторій, технічну специфіку продукту та стиль комунікації бренду. У B2B-секторі такі моделі використовуються для: розроблення технічних описів продукції та їх адаптації під потреби різних підрозділів компанії-клієнтів (інженерів, закупівельників, фінансових аналітиків), підготовки презентацій, аналітичних звітів, порівняльних характеристик та комерційних пропозицій, створення візуального контенту – схем, інфографік, 3D-моделей, які полегшують сприйняття складної інформації. Завдяки генеративним моделям значно скорочується час підготовки технічної документації та підвищується її стандартизованість, що сприяє ефективнішій взаємодії між підприємствами;

– прогнозна аналітика є ключовим інструментом, що дозволяє підприємствам оцінювати майбутню поведінку контрагентів та ухвалювати проактивні управлінські рішення. У системах маркетингових комунікацій B2B прогнозна аналітика застосовується для: визначення пріоритетності клієнтів через оцінку потенціалу повторних закупівель і можливості масштабування співпраці, аналізу ефективності комунікаційних каналів і вибору

оптимальної платформи для контакту з конкретною групою стейкхолдерів, визначення часу, коли ймовірність позитивної реакції на комунікаційне повідомлення є максимально високою. Ці можливості роблять прогнозу аналітику важливим елементом стратегічного управління маркетинговою діяльністю у промисловому секторі.

Отже, штучний інтелект формує нову парадигму B2B-комунікацій, у якій швидкість, точність і персоналізація інформаційних потоків стають ключовими детермінантами ефективності. Інтеграція AI у комунікаційні стратегії підприємств забезпечує перехід від фрагментованих, реактивних підходів до системних, аналітично обґрунтованих моделей взаємодії між учасниками промислових ринків.

Інтеграція штучного інтелекту в комунікаційні процеси промислових підприємств спричиняє глибоку модернізацію механізмів взаємодії з клієнтами, оптимізацію інформаційних потоків, а також підвищення точності управлінських рішень. В умовах B2B-маркетингу, де кожен контакт супроводжується значним обсягом техніко-економічної інформації, а рішення приймаються групою стейкхолдерів, AI виступає каталізатором підвищення ефективності комунікацій та прискорення життєвого циклу угод.

Сфера первинної комунікації є однією з найбільш трудомістких у B2B-сегменті, оскільки передбачає систематичну обробку технічних запитів, роз'яснень та уточнень щодо характеристик продукції чи умов співпраці. Впровадження інтелектуальних систем автоматизованої взаємодії – чат-ботів, голосових асистентів та спеціалізованих AI-модулів – дозволило суттєво трансформувати цей процес.

Сучасні AI-боти не обмежуються виконанням функцій операторів довідкової служби. Вони здатні здійснювати попередній кваліфікаційний аналіз запитів, структурувати технічні параметри замовлення, зіставляти їх із наявними виробничими можливостями та визначати найбільш компетентного менеджера для подальшої комунікації. У ряді промислових компаній системи штучного інтелекту вже обслуговують більшість початкових звернень, що зменшує навантаження на відділи продажу та прискорює процес реагування клієнтам. Важливо підкреслити, що автоматизована взаємодія базується на аналізі попередніх контактів, історії співпраці та специфіки галузі клієнта, що дозволяє створювати індивідуалізовані сценарії обслуговування навіть на початковому етапі комунікації.

Однією з найбільш ресурсомістких функцій маркетингових підрозділів промислових підприємств є підготовка технічного та презентаційного контенту. Штучний інтелект дозволяє радикально скоротити час на створення таких матеріалів, одночасно підвищуючи їхню структурну узгодженість та точність. AI-системи нині ефективно генерують широкий спектр спеціалізованих матеріалів, включаючи технічні паспорти продукції, модульні комерційні пропозиції, галузеві огляди, розширені специфікації та візуальні моделі обладнання. Використання генеративних алгоритмів дає змогу адаптувати контент до інформаційних потреб окремих груп стейкхолдерів – інженерів, закупівельників, технологів, аудиторів, що підвищує прозорість комунікації та прискорює процес ухвалення рішень.

Стандартизація контенту, сформованого за допомогою AI, мінімізує ймовірність технічних помилок, забезпечує єдність стилю та структури матеріалів, а також дозволяє швидко оновлювати інформацію у відповідь на зміни асортименту чи специфікацій.

Окремою сферою застосування штучного інтелекту є вдосконалення процесів залучення та кваліфікації потенційних клієнтів. У B2B-сегменті, де вартість лідогенерації є значно вищою, ніж у B2C, здатність точно визначити потенціал клієнта набуває особливої важливості. AI-моделі lead scoring здійснюють комплексний аналіз різнорідних даних: історії звернень, взаємодії з контентом, активності на веб-ресурсах компанії, галузевих показників, попередніх закупівель та індикаторів готовності до співпраці. На основі цього формуються пріоритети обслуговування клієнтів, а також прогностичні оцінки ймовірності укладення угоди. Використання таких інструментів дає змогу зменшити транзакційні витрати маркетингових відділів, сконцентрувати ресурси на найбільш перспективних контрагентах та оптимізувати етапи формування комерційних пропозицій. Крім того, AI забезпечує можливість адаптивного лід-менеджменту, за якого система автоматично змінює статуси та траєкторії клієнтів відповідно до нових даних.

Штучний інтелект забезпечує якісно новий рівень управління рекламними та PR-комунікаціями у промисловому секторі. Йдеться не лише про автоматизацію рутинних процесів, а про здатність системи самостійно приймати рішення на основі аналізу багатофакторних змінних. AI-технології здійснюють оптимізацію комунікаційних кампаній у кількох вимірах:

- вибір каналів комунікації на основі моделювання їхньої ефективності для різних типів аудиторій;
- динамічне тестування повідомлень, що передбачає паралельне порівняння впливу альтернативних варіантів контенту;
- прогнозування результативності рекламних активностей із застосуванням моделей оцінки взаємодії клієнтів;
- аналіз репутаційного середовища, включаючи виявлення інформаційних ризиків, відстеження тональності згадувань та прогноз змін у сприйнятті бренду.

Такі можливості створюють передумови для формування адаптивних комунікаційних стратегій, які оперативно реагують на динаміку ринку та зміни інформаційного середовища. В умовах B2B-ринку, де вартість помилок у комунікаціях є високою, а цикли ухвалення рішень – тривалими, подібні інструменти відіграють стратегічну роль.

Інтеграція інструментів штучного інтелекту у комунікаційні процеси промислових підприємств формує нові стандарти результативності маркетингової діяльності у сегменті B2B. За результатами узагальнення наявних емпіричних досліджень і практик цифрової трансформації відомих дослідницьких організацій, таких як *McKinsey & Company* [16], *Deloitte* [17] та інших, застосування *AI* призводить до комплексного підвищення продуктивності комунікаційних систем. Зокрема, відзначається істотне скорочення часу обробки вхідних звернень: алгоритми автоматичної взаємодії та інтелектуальні боти дозволяють прискорити реакцію компанії у 2–3 рази порівняно з традиційними методами, що є критично важливим у конкурентному середовищі промислових ринків.

Помітно зростає точність персоналізації комунікацій – на 40–60%, що пояснюється здатністю *AI*-систем аналізувати багатовимірні дані й адаптувати зміст повідомлень до специфіки кожного клієнта або сегмента. Паралельно відбувається оптимізація витрат: автоматизація рутинних процесів і зниження людської участі у стандартних комунікаційних операціях дає можливість скоротити маркетингові витрати на 15–30%.

Завдяки *AI* підвищується й ефективність лідогенерації: рівень конверсії у цільові звернення або комерційні пропозиції зростає на 20–35%. Крім того, оптимізація внутрішніх комунікаційних потоків досягає понад 50%, адже *AI* усуває дублювання завдань, прискорює верифікацію даних, забезпечує прозорість процесів і дає змогу централізовано координувати взаємодію між підрозділами.

Таким чином, у B2B-секторі штучний інтелект виступає не лише операційним інструментом, а стратегічним ресурсом, який формує нову модель організації комунікацій. *AI* стає ядром цифрової екосистеми підприємства, забезпечуючи швидкість, точність і адаптивність інформаційних потоків – чинники, що визначають конкурентоспроможність у промисловому середовищі.

Попри значні перспективи, впровадження інструментів штучного інтелекту супроводжується низкою викликів, які можуть ускладнювати або сповільнювати трансформаційні процеси. Ці ризики можна систематизувати за трьома ключовими групами: технічні, етичні та організаційні.

До технічних бар'єрів належать насамперед труднощі інтеграції *AI*-рішень із наявними інформаційними системами підприємства – CRM, ERP, системами документообігу та виробничими платформами. Відсутність єдиного цифрового середовища ускладнює обмін даними й зменшує ефективність роботи алгоритмів.

Другим важливим чинником є якість вихідної інформації. Алгоритми штучного інтелекту залежать від достовірності та повноти даних; у разі наявності фрагментованої, застарілої або непослідовної інформації виникають похибки у результатах аналізу та прогнозування. Для промислового сектора це може призвести до формування некоректних технічних рекомендацій або помилкових управлінських висновків.

З етичної та правової точки зору особливо актуальними є питання захисту комерційної інформації. *AI*-системи працюють з великими масивами даних, зокрема з конфіденційними технічними характеристиками, фінансовими показниками й деталями контрактів. Недостатній рівень безпеки може створити загрозу витоку даних або несанкціонованого доступу.

Окремої уваги потребує контроль автоматизованих рішень. *AI* може формувати рекомендації чи оцінки, які не завжди відповідають стратегічним цілям підприємства, через що потрібен механізм подвійної перевірки результатів. Додатковою проблемою є можливі неточності генеративних моделей – помилки в технічних описах або неправильна інтерпретація галузевої термінології можуть призвести до репутаційних та фінансових ризиків.

На організаційному рівні ключовими викликами є опір персоналу та недостатність цифрових компетентностей. Співробітники часто сприймають впровадження *AI* як загрозу робочим місцям, що породжує негативне ставлення та гальмує прийняття технологічних змін.

Також підприємства стикаються з потребою перегляду внутрішніх регламентів, адаптацією процедур документообігу та встановленням нових стандартів комунікації. Ризики підсилюються відсутністю фахівців, здатних забезпечити ефективне управління *AI*-рішеннями та їх подальший розвиток.

Висновки

Отже, в ході виконання дослідження здійснено комплексне обґрунтування застосування штучного інтелекту в системі маркетингових комунікацій промислових підприємств B2B-сектора. Детально проаналізовано чотири ключові групи *AI*-технологій – машинне навчання, *NLP*, генеративні моделі та прогнозну аналітику – і визначено механізми їхнього впливу на різні етапи комунікаційного процесу: від первинної взаємодії з клієнтом до формування технічної документації, персоналізованих пропозицій і управління лідогенерацією. Встановлено, що використання *AI* забезпечує скорочення часу реагування на запити, підвищення точності сегментації, покращення аналітичної підтримки рішень і оптимізацію внутрішніх комунікаційних потоків.

Подальших досліджень вимагають питання розроблення інтегрованих моделей оцінювання ефективності *AI*-комунікацій у B2B, методики гармонізації *AI*-алгоритмів із внутрішніми корпоративними процесами, а також дослідження впливу *AI* на довгострокові партнерські відносини між підприємствами. Перспективним напрямом є також формування галузевих стандартів безпеки та якості даних, які забезпечать надійність, прозорість і контрольованість *AI*-рішень у промислових комунікаціях.

Список використаної літератури

1. Буга, Н., Огренчук, А. Маркетингові комунікації нового покоління: цифрові технології управління взаємодією з клієнтами. *Економіка та суспільство*. 2025. № 79. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-79-153>.
2. Благун І., Шурпа С. Трансформація маркетингових комунікацій у промисловому секторі: виклики цифрової епохи. *Актуальні проблеми розвитку економіки регіону*. 2025. № 1 (21). С. 260–267. URL: <https://doi.org/10.15330/apred.1.21.260-267>.
3. Кобернюк С., Струнгар А., Завгородня Л. Аналіз ролі та ефективності використання штучного інтелекту у вдосконаленні персоналізованої реклами та взаємодії з аудиторією. *Економіка та суспільство*. 2024. Вип. 61. URL: DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-61-112>.
4. Коломицева О. В., Васильченко Л.С., Пепчук С.М. Маркетингові комунікації підприємства: стратегічні вектори розвитку в епоху цифрової економіки : монографія. Мін-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси : Видавець Гордієнко Є. І., 2022, 455 с.
5. Котлер Ф., Гермаван К., Сетьяван І. Маркетинг 4.0. Від традиційного до цифрового: пер. з англ. К. Куницької та О. Замаєвої. Київ: Вид. група КМ-БУКС, 2018. 208 с., іл.
6. Кушнір А. М. Особливості внутрішньофірмових комунікацій промислових підприємств в умовах турбулентності. *Economic Problems and Legal Practice*. 2024. Т. 20, № 1. С. 174–181. URL: <https://doi.org/10.33693/2541-8025-2024-20-1-174-181>.
7. Ліганенко І., Боденчук П., Москалюк В. Штучний інтелект в цифровому маркетингу. *Трансформаційна економіка*. 2024. Вип. 2 (7). С. 33–38. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-8141/2024-7-6>.
8. Лядський І.К., Шульга Л.В., Кушніренко М.О. Штучний інтелект у маркетингових комунікаціях – новий підхід до реклами. *Бізнес-навігатор*. 2005. № 1 (78). С. 403-407. URL: <https://doi.org/10.32782/business-navigator.78-67>.
9. Лісова Р. М. Індустрія 4.0 та цифрова готовність українських промислових підприємств. Економічний вісник. Серія: фінанси, облік, оподаткування. 2021. № 7. С. 86–96.
10. Проскурніна Н. Штучний інтелект у маркетинговій діяльності. *Зовнішня торгівля: економіка, фінанси, право*. 2020. № 4. С. 129–140. DOI: [https://doi.org/10.31617/zt.knute.2020\(111\)09](https://doi.org/10.31617/zt.knute.2020(111)09).
11. Соколова Ю.О., Широкопад Д.В. Технології та інструменти цифрового маркетингу для просування медичних закладів. *Ефективна економіка*. 2024. № 7. URL: <https://www.nayka.com.ua/index.php/ee/article/view/4240/4275>. DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.7.64>.
12. Хрупович С., Мазур О., Сливяк А. Технології використання штучного інтелекту у B2B маркетингу. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2024. Вип. 330 (3). С. 354–357. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-330-53>.
13. Храпкіна В., Сенелюк А. Персоналізація клієнтського досвіду в CRM-системах за допомогою технологій штучного інтелекту. *Галицький економічний вісник*. 2025. Том 94. № 3. С. 120–128.
14. Цибко Н. Сучасні інструменти партнерського маркетингу на ринку B2B. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2023. № 5. С. 157-162. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2023-322-5-26>.
15. Kotler P., Kartajaya H., Setiawan I. (2021). *Marketing 5.0: Technology for Humanity*. USA: John Wiley & Sons, 2021. 224 p.
16. The State of AI: How organizations are rewiring to capture value (2025). McKinsey & Company. URL: <https://surl.it/dgaguf>.
17. The State of Generative AI in the Enterprise (2024). Deloitte. URL: <https://www.deloitte.com/content/dam/assets-zone3/us/en/docs/campaigns/2025/us-state-of-gen-ai-2024-q4.pdf>.

References

1. Buha, N., Ohrenchuk, A. (2025). Marketynhovi komunikatsii novoho pokolinnia: tsyfrovi tekhnolohii upravlinnia vzaemodiieiu z kliientamy [New generation marketing communications: digital technologies for customer interaction management using]. *Economy and Society*, no. 79. [in Ukrainian].
2. Blahun I., Shurpa S. (2025). Transformatsiia marketynhovyykh komunikatsii u promyslovomu sektori: vyklyky tsyfrovoi epokhy [Transformation of marketing communications in the industrial sector: challenges of the digital age]. *Aktualni problemy rozvytku ekonomiky rehionu*, no. 1 (21), pp. 260–267. [in Ukrainian].
3. Koberniuk S., Strungar A., Zavorodnia L. (2024) Analiz roli ta efektyvnosti vykorystannia shtuchnoho intelektu u vdoskonalenni personalizovanoi reklamy ta vzaemodii z audytoriei [Analysis of the role and effectiveness of artificial intelligence in improving personalized advertising and audience interaction]. *Ekonomika ta suspil'stvo*. no 61. [in Ukrainian]
4. Kolomytseva O. V., Vasylychenko L.S., Pepchuk S.M. (2022). Marketynhovi komunikatsii pidpriemstva: stratehichni vektory rozvytku v epokhu tsyfrovoi ekonomiky : monohrafiia [Enterprise marketing communications: strategic vectors of development in the era of the digital economy]. Cherkasy : Vydavets Hordiienko Ye. I. [in Ukrainian].

5. Kotler F., Hermawan K., Setiawan Yi. (2018). Marketynh 4.0. Vid tradytsiinoho do tsyfrovoho: per. z anhli. K. Kunytskoi ta O. Zamaievoi [Marketing 4.0. From additional to digital]. Kyiv: Vyd. hrupa KM-BUKS. [in Ukrainian].
6. Kushnir A.M. (2024). Osoblyvosti vnutrishnofirmovykh komunikatsii promyslovykh pidpriemstv v umovakh turbulentnosti [Peculiarities of intra-company communications of industrial enterprises in conditions of turbulence]. *Economic Problems and Legal Practice*, vol.20, no.1, pp. 174-181. [in Ukrainian].
7. Lihanenko I., Bodenchuk P., Moskaliuk V. (2024) Shtuchnyi intelekt v tsyfroviiu marketynhu [Artificial intelligence in digital marketing]. *Transformatsiina ekonomika*, no. 2 (7). pp. 33–38. [in Ukrainian].
8. Liadskyi I. K., Reshetnikova O. V., Pysarenko V. V. (2024) Poiednannia sotsial'noho intelektu kopiraitera ta mozhlyvosti neyiromezeh dlia pidvyshchennia efektyvnosti biznesu v sotsial'nykh merezhakh [Combining the social intelligence of the copywriter and the capabilities of neural networks to enhance business efficiency in social networks]. *Ekonomichnyi prostir*, no 196. pp. 50–54. [in Ukrainian].
9. Lisova R. M. (2021). Industriia 4.0 ta tsyfrova hotovnist ukraïnskykh promyslovykh pidpriemstv [Industry 4.0 and Digital Readiness of Ukrainian Industrial Enterprises]. *Ekonomichnyi visnyk. Seriya: finansy, oblik, opodatkovannia – Economic Bulletin. Series: Finance, Accounting, Taxation*, no. 7, pp. 86–96. [in Ukrainian].
10. Proskurnina N. (2020). Shtuchnyi intelekt u marketynhovi diial'nosti [Artificial intelligence in marketing activities]. *Zovnishnia torhivlia: ekonomika, finansy, pravo*, no 4. pp. 129–140. [in Ukrainian].
11. Sokolova Yu.O., Shyrokograd D.V. (2024). Tekhnolohii ta instrumenty tsyfrovoho marketynhu dlia prosvannia medychnykh zakladiv [Digital marketing technologies and tools for promoting medical institutions]. *Efektivna ekonomika*, no.7. [in Ukrainian].
12. Khruppovych S., Mazur O., Sliviak A. (2024) Tekhnolohii vykorystannia shtuchnoho intelektu u B2B marketynhu [Technologies for using artificial intelligence in B2B marketing]. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. Ekonomichni nauky*, no. 330 (3). pp. 354–357. [in Ukrainian].
13. Khrapkina V., Seneliuk A. (2025) Personalizatsiia klientskoho dosvidu v CRM-systemakh za dopomohoiu tekhnolohii shtuchnoho intelektu [Personalization of customer experience in CRM systems through artificial intelligence technologies]. *Galician economic journal (Tern.)*, vol. 94, no 3, pp. 120-128. [in Ukrainian].
14. Tsybko N. (2023). Suchasni instrumenty partnerskoho marketynhu na rynku V2V [Modern affiliate marketing tools in the B2B market]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, no.5, pp.157-162. [in Ukrainian].
15. Kotler P., Kartajaya H., Setiawan I. (2021). *Marketing 5.0: Technology for Humanity*. USA: John Wiley & Sons. [in English].
16. *The State of AI: How organizations are rewiring to capture value (2025)*. McKinsey & Company. [in English].
17. *The State of Generative AI in the Enterprise (2024)*. Deloitte. [in English].

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

ПУБЛІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

УДК 343.352:340.134:351.74(100)

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.2.31>

В. О. БЕСКОРОВАЙНИЙ

аспірант кафедри державного управління і місцевого самоврядування

Херсонський національний технічний університет

ORCID: 0009-0009-3958-8343

СВІТОВІ ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ КОРУПЦІЇ, ЇЇ СКЛАДОВИХ
ТА БОРОТЬБИ З НЕЮ

У статті здійснено комплексне дослідження світових підходів до визначення корупції, її основних складових і моделей боротьби з цим явищем у межах різних правових систем. Визначено, що у міжнародному дискурсі корупція трактується як багаторівнева правова та соціально-управлінська проблема, що вимагає системного аналізу юридичних, інституційних та культурних чинників. Акцент зроблено на порівнянні континентальної та острівної моделей права, кожна з яких продукує відмінні правові визначення, механізми превенції й реагування на корупційні діяння. Дослідження охоплює нормативні основи, індекси сприйняття корупції, функціонування національних антикорупційних органів та міжнародні комплаєнс-рекомендації.

Метою статті є концептуалізація корупції у світовому правовому дискурсі, аналіз інституційно-правових підходів до її класифікації та боротьби з урахуванням порівняльного правознавства. Методологічну базу становлять структурно-функціональний та порівняльно-правовий підходи, контент-аналіз національного й міжнародного антикорупційного законодавства та звітності.

У ході дослідження ідентифіковано ключові типи корупції (політичну, адміністративну, економічну та корпоративну), а також умови їх поширення в межах різних моделей публічного управління. Встановлено, що в країнах континентальної правової традиції домінує формалізоване нормативне регулювання з розгалуженою процедурною відповідальністю, тоді як острівна модель спирається на прецеденти та етичні стандарти. Проаналізовано поточні тенденції Індексу сприйняття корупції, інституційну ефективність антикорупційних органів та роль механізмів запобігання, зокрема програм комплаєнсу, моніторингу доброчесності та цифрової звітності.

Сформульовано висновки про необхідність локалізації міжнародних практик через адаптацію до національного правового контексту. Підтверджено доцільність переходу до превентивної моделі боротьби з корупцією, що включає етичне саморегулювання, прозорість і цифровізацію управлінських процесів. Окреслено напрями оптимізації антикорупційної політики: посилення корпоративної відповідальності, інституційного моніторингу та використання індикаторів доброчесності.

Ключові слова: корупція, правові системи, антикорупційна політика, нормативне регулювання, інституційні механізми, публічне управління.

V. O. BESKOROVAINYI

Postgraduate Student at the Department of Public Administration

and Local Self-Government

Kherson National Technical University

ORCID: 0009-0009-3958-8343

GLOBAL APPROACHES TO DEFINING CORRUPTION, ITS COMPONENTS, AND COMBATING IT

The article conducts a comprehensive study of global approaches to defining corruption, its main components and models of combating this phenomenon within different legal systems. It is determined that in the international discourse corruption is interpreted as a multi-level legal and socio-administrative problem that requires a systematic analysis of legal, institutional and cultural factors. The emphasis is on comparing continental and insular models of law, each of which produces different legal definitions, prevention mechanisms and responses to corrupt acts. The study covers regulatory frameworks, corruption perception indices, the functioning of national anti-corruption bodies and international compliance recommendations. The aim of the article is to conceptualize corruption in the global legal discourse, analyze institutional and legal approaches to its classification and combating, taking into account comparative jurisprudence. The methodological basis is the structural-functional and comparative legal approaches, content analysis of national and international anti-corruption legislation and reporting.

© В. О. Бескоровайний, 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

The study identified key types of corruption (political, administrative, economic and corporate), as well as the conditions for their spread within different models of public administration. It was established that in countries with a continental legal tradition, formalized regulatory regulation with extensive procedural responsibility dominates, while the insular model relies on precedents and ethical standards. The current trends of the Corruption Perception Index, the institutional effectiveness of anti-corruption bodies and the role of prevention mechanisms, in particular compliance programs, integrity monitoring and digital reporting, were analyzed.

The conclusions were formulated on the need to localize international practices through adaptation to the national legal context. The feasibility of transitioning to a preventive model of combating corruption, which includes ethical self-regulation, transparency and digitalization of management processes, was confirmed. The directions for optimizing anti-corruption policy were outlined: strengthening corporate responsibility, institutional monitoring and the use of integrity indicators.

Key words: corruption, legal systems, anti-corruption policy, regulatory framework, institutional mechanisms, public administration.

Постановка проблеми

Корупція у сучасному світі набула системного характеру, впливаючи на політичну, економічну та правову стабільність держав. Це явище складається з кількох взаємопов'язаних секторів (політичного, адміністративного, економічного та корпоративного), кожен з яких має власні механізми та прояви. У глобальному вимірі проблема ускладнюється тим, що корупція формується на перетині державного управління, приватного сектору та поведінкових моделей суспільства, що робить традиційні інструменти протидії обмеженими та фрагментарними.

Особливої уваги потребує різниця правових підходів. У країнах континентальної правової системи домінує нормативне визначення корупції як правопорушення, зосереджене на формальних заборонах і кримінальній відповідальності [1; 2]. Натомість у державах системи загального (острівного) права акцент робиться на прецеденті та відповідальності посадовців, включно з корпоративним сектором, що зумовлює ширше трактування корупційних практик та персональних зловживань [3, р. 134–136]. Порівняння цих моделей демонструє відсутність уніфікованого підходу навіть серед країн із високим рівнем правової культури.

Одним із наслідків зазначених відмінностей є низька ефективність міжнародних антикорупційних стратегій. Попри активізацію глобальних ініціатив, корупція продовжує проникати в ключові державні та економічні інститути, зокрема в оборонний сектор і сферу публічного управління. Водночас міжнародні організації, такі як «Organisation for Economic Co-operation and Development» (далі – OECD), наголошують на потребі переходу від каральної моделі до системних механізмів запобігання як на державному, так і корпоративному рівнях [4].

Актуальність дослідження посилюється тим, що світ досі не виробив універсального визначення корупції, придатного для різних правових систем та соціально-політичних умов. Це ускладнює формування єдиних стандартів доброчесності, прозорості та відповідальності. Відсутність методологічної узгодженості між континентальним і острівним підходами стримує ефективність міжнародного правового співробітництва, що й зумовлює потребу в комплексному аналізі корупції як багатокомпонентного явища з погляду права, державного управління та інституційної політики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання природи корупції широко досліджується у працях вітчизняних і зарубіжних науковців, однак підходи до її визначення істотно різняться. У вітчизняній науці, як зазначає Ю. Ірха, корупція розглядається як багатокомпонентне суспільне явище, що охоплює політичний, адміністративний та економічний сектори [5]. Схожу позицію висловлює А. Мошнін, підкреслюючи, що в Україні корупція має інституційну природу та зберігає стійкість попри зміну політичних еліт [6]. Вагомий внесок у дослідження механізмів запобігання корупції зроблено В. Пироговською та О. Предместніковим, які обґрунтовують важливість адміністративного права у мінімізації корупційних ризиків [1]. Водночас В. Гришко фіксує, що у період воєнного стану масштаби зловживань зростають, а традиційні інструменти контролю послаблюються [7].

Зарубіжні дослідження охоплюють ширший міждисциплінарний контекст. Науковиця А. Петерс (A. Peters) аналізує зв'язок між корупцією і правами людини, доводячи, що системні зловживання підривають демократичний конституціоналізм [8]. У свою чергу, Р. Добсон Філіпс (R. Dobson Phillips), Е. Давід-Барретт (E. Dávid-Barrett) та Р. Баррінгтон (R. Barrington) наголошують на контекстній природі поняття «корупція», підкреслюючи, що її дефініції залежать від конкретної правової моделі – континентальної чи англосаксонської [9]. Дослідження Дж. Гордер (J. Horder) відображає еволюцію підходів в острівній (прецедентній) системі, де посилюється відповідальність корпоративних структур [3], тоді як М. Беллінджері (M. Bellingeri) та Ф. Луппі (F. Luppi) розкривають колізії в антикорупційному законодавстві ЄС [10].

Окремий блок джерел присвячено інституційним методам боротьби з корупцією. Т. Демчук аналізує результати роботи антикорупційних органів і доходить висновку про недостатню дієвість існуючих інструментів [11]. Х. Ярмакі та В. Ярмакі, досліджуючи міжнародний досвід, підкреслюють обмеженість механічного запозичення моделей без адаптації до національних умов [12]. Л. Машковська зосереджується на прогалинах правового

регулювання, що залишають «критичні шпарини» у сфері запобігання корупційним правопорушенням [13]. Водночас А. Макурін акцентує на зв'язку між рівнем корупції та якістю публічної влади [14].

Підсумовуючи, можна виокремити три ключові проблеми, що залишаються невирішеними по тематиці даного дослідження: відсутність універсального визначення корупції для різних правових систем; недостатність комплексних досліджень, які поєднують політичний, адміністративний і корпоративний сектори; фрагментарність порівняльно-правового аналізу континентальної та англосаксонської традицій. Саме ці наукові прогалини зумовлюють потребу у комплексному системному дослідженні, якому присвячено дану статтю.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є проведення комплексного аналізу світових підходів до визначення корупції як багатосекторного явища, порівняння особливостей її проявів у континентальній та острівній правових системах, а також окреслення напрямів удосконалення механізмів протидії на основі міжнародних практик. Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких завдань:

1. Дослідити сутність корупції та розкрити її структуру через аналіз ключових секторів (політичного, адміністративного, економічного та корпоративного).
2. Проаналізувати та порівняти підходи до розуміння і правового регулювання корупції у континентальній і острівній правових системах;
3. Сформулювати та обґрунтувати рекомендації щодо підвищення результативності антикорупційної політики з урахуванням міжнародного досвіду й виявлених проблем.

Викладення основного матеріалу дослідження

Публічні аналітичні огляди свідчать, що Україна залишається на межі системного ризику у сфері протидії корупції, незважаючи на формальну активізацію інституційних інструментів. Так, у Індексі сприйняття корупції 2024 року Україна посіла 104 місце зі 180 країн із загальним балом 36 зі 100, що вказує на стабільно низький рівень довіри до державних інститутів [15]. Така динаміка демонструє, що міжнародні рекомендації залишаються декларативними, якщо не інтегровані в контекстуальні реформи.

Особливої ваги в цьому контексті набувають результати Національного агентства з питань запобігання корупції (далі – НАЗК) в їх офіційному звіті за 2024 рік. У документі наголошується на тому, що ключовими проблемами залишається фрагментарність координації антикорупційної політики, обмеженість превентивних інструментів на місцевому рівні, а також недостатній рівень захисту викривачів [16]. Понад 40% виявлених корупційних ризиків пов'язані із закупівельними процедурами, що вимагає більш жорсткого контролю та автоматизації перевірок.

Ці факти підтверджують необхідність не просто запозичення світових підходів, а саме їх змістовної локалізації та послідовного впровадження. Інтеграція індикаторів доброчесності, цифрових рішень для аналітики ризиків і підвищення професійного рівня уповноважених осіб може стати критичним чинником стійкості антикорупційної політики в умовах перехідного правопорядку. Це вимагає не лише інституційної модернізації, а й суспільного контракту щодо нетерпимості до зловживань.

Корупція у сучасних правових реаліях визначається не як одичне правопорушення, а як багатокomпонентне явище, що охоплює низку секторів суспільного життя. На підставі узагальнення сучасних наукових тенденцій доцільно виокремити щонайменше чотири основні сектори: політичний, адміністративний, економічний і корпоративний. Кожен із них має власну інфраструктуру корупційних ризиків, інструментів зловживань і механізмів приховування.

У політичному секторі корупція переважно проявляється у вигляді неформального впливу, протекціонізму та незаконного фінансування партій [5, с. 9–12]. Адміністративний рівень страждає через відсутність системи стримувань і противаг, надмірну дискрецію та викривлену службову мотивацію [1]. Економічна корупція, що охоплює ухилення від оподаткування, змови у тендерах, бюджетне розкрадання, стала системною в умовах низької прозорості фінансових потоків [6, с. 108–109]. Особливо варто виділити корпоративний сектор – саме тут спостерігається тіньове регулювання, конфлікти інтересів у великих підприємствах, а також непрозорі механізми лобізму [2].

Корупція є багатовекторним явищем, що проявляється у різних сферах суспільного життя та функціонує за власною внутрішньою логікою у кожному секторі. Для глибшого розуміння її структури доцільно здійснено типологізацію основних сфер прояву корупційних практик. Наведена табл. 1 дозволяє порівняти ключові характеристики політичного, адміністративного, економічного та корпоративного секторів.

Таблиця 1

Основні сектори корупції та їхні ключові характеристики

Сектор	Типові прояви корупції	Ризики для суспільства
Політичний	Клієнтелізм, підкуп, вплив через спонсорство	Підрив демократії та довіри
Адміністративний	Надмірна дискреція, неефективний контроль	Зниження якості публічного управління
Економічний	Тіньові схеми, ухилення від оподаткування	Фінансові втрати, нерівність
Корпоративний	Лобізм, конфлікт інтересів, недоброчесні контракти	Монополізація, підрив конкуренції

Джерело: узагальнено автором на основі даних [1; 2; 5, с. 9–12; 6, с. 108–109; 15].

Правові системи світу неоднаково підходять до розуміння й регулювання корупції. У країнах континентального права домінує формально-нормативний підхід, що зосереджений на кодифікованих положеннях і кримінальній відповідальності. Зокрема, нормативи визначають перелік корупційних діянь і механізми контролю з боку держави [1]. Натомість система острівного права базується на прецеденті й судовій практиці, де правова оцінка корупції є більш гнучкою і залежить від конкретного випадку [3, р. 133–135].

Варто підкреслити, що острівна модель передбачає активну участь корпоративного сектору в правовій відповідальності, включно із застосуванням інституту «колективної вини». У континентальному варіанті такий механізм частіше відсутній, що створює прогалини у боротьбі з транснаціональними корупційними схемами. Водночас обидві системи демонструють спільну проблему – недостатню ефективність інституційного нагляду на рівні реалізації норм.

У контексті відсутності уніфікованого визначення корупції особливої ваги набуває аналіз правових систем, у межах яких формуються антикорупційні механізми. Зазначені в попередньому розділі підходи демонструють не лише теоретичні розбіжності, а й глибокі інституційні відмінності в розумінні природи правопорушень та меж відповідальності. При цьому вплив правової традиції (континентальної або острівної) визначає не лише термінологічні аспекти, а й структуру органів контролю, обсяг повноважень суду та роль прецеденту у кваліфікації корупційних практик. У табл. 2 узагальнено порівняльні характеристики цих двох підходів з фокусом на їх практичному застосуванні.

Таблиця 2

Порівняння континентальної та острівної моделей у сфері боротьби з корупцією

Параметр	Континентальна система	Острівна система
База правового регулювання	Закон (кодекси)	Судовий прецедент
Фокус регулювання	Опис злочинів, санкцій	Оцінка поведінки в конкретному випадку
Корпоративна відповідальність	Обмежена або відсутня	Визнана та закріплена у судовій практиці
Гнучкість інтерпретації	Низька	Висока
Рівень контролю виконання	Централізований	Децентралізований

Джерело: узагальнено автором на основі даних [1; 3, р. 133–135; 7; 10; 16].

Орієнтація антикорупційної політики у XXI столітті дедалі більше зміщується від репресивного підходу до превентивної парадигми. Такий підхід базується на впровадженні систем комплаєнсу, формуванні добросесної поведінки в органах публічної влади та бізнес-структурах, а також на структурному зміцненні інституцій, відповідальних за прозорість і підзвітність. Сутність змін полягає не лише у запровадженні нових інструментів, а в трансформації управлінської філософії, яка передбачає нульову толерантність до корупції на всіх рівнях управління.

Міжнародні організації, зокрема OECD, послідовно наголошують на пріоритеті антикорупційної культури, що передбачає обов'язкове впровадження кодексів етики, механізмів внутрішнього контролю, прозорих процедур добору кадрів та декларування майна [4; 11]. Ці практики ефективно інтегруються в країнах із високим рівнем правосвідомості та інституційної спроможності. Водночас застосування зазначених інструментів в умовах низької правової культури або політичної нестабільності часто не дає очікуваних результатів, що вимагає врахування контекстуальних чинників.

Запозичення формальних інститутів без належної адаптації до національного правового середовища знижує дієвість навіть найкращих зразків міжнародного досвіду. Як свідчить аналітика щодо діяльності антикорупційної інфраструктури в Україні, зокрема НАЗК, ефективність превентивних механізмів обмежується недосконалістю правозастосування, низьким рівнем цифровізації та кадровими ризиками [16]. У цьому контексті важливою умовою є не лише наявність політичної волі, а й створення комплексної системи добросесності, де ключову роль відіграють культура прозорості, цифрові платформи контролю та суспільна нетерпимість до зловживань.

Рекомендаційний вектор антикорупційної політики повинен спиратись на поєднання трьох стратегічних компонентів: управлінської профілактики, правової визначеності та інституційної спроможності. Для цього доцільно розробляти національні індикатори добросесності, адаптувати корпоративні комплаєнс-програми та проводити періодичний аудит ризиків у публічному секторі. Визначальним також є посилення контролю за політичними фінансами та прозорість державних закупівель. Сформовані рекомендації щодо підвищення результативності антикорупційної політики представлено в табл. 3.

Тематика даного дослідження засвідчила складність та багатомірність явища корупції, яке охоплює правові, інституційні й культурні аспекти. Порівняльний аналіз світових підходів дозволив виявити як ефективні практики, так і обмеження універсалізації антикорупційної політики без урахування національного контексту. Особливу значущість набуває інтеграція превентивних механізмів, правової визначеності та інституційної добросесності. Результати напрацювань спрямовані на формування збалансованої, адаптивної та стійкої антикорупційної стратегії.

Таблиця 3

Рекомендації щодо посилення результативності антикорупційної політики з урахуванням міжнародного досвіду

Напрямок	Рекомендований інструмент	Очікуваний результат
Правовий	Впровадження чіткого визначення корупції в національному законодавстві	Зменшення правової невизначеності та посилення відповідальності
Інституційний	Розвиток незалежних органів нагляду, внутрішнього контролю та електронного декларування	Підвищення прозорості та зниження ризику зловживань
Управлінський	Впровадження кодексів етики, систем комплаєнсу, контроль за прозорістю державних закупівель	Формування добросовісної управлінської культури
Освітній	Системна антикорупційна просвіта для держслужбовців і молоді	Створення несприятливого середовища для корупційних практик
Цифровий	Розширення електронних послуг і відкритих даних у сфері публічного управління	Зниження контактних ризиків і моніторинг дій посадовців

Джерело: авторська розробка.

Висновки

Сучасні трансформації державного управління, посилені глобальними викликами й технологічними зрушеннями, актуалізують потребу в переосмисленні антикорупційної політики як у межах окремих держав, так і на міжнародному рівні. Корупція не є однорідним явищем – її структура охоплює політичний, адміністративний, економічний і корпоративний сектори, кожен з яких функціонує за внутрішньою логікою. Такий підхід дозволив виявити, що ефективна протидія можлива лише за умови поєднання комплексного аналізу секторів та впровадження міждисциплінарних механізмів правового впливу.

Досліджено, що корупція проявляється у формі клієнтелізму, тіньових фінансів, протекціонізму, службового зловживання й недобросовісного лобізму, зумовлюючи ризики для демократичного устрою та соціально-економічної стабільності. Проаналізовано ключові характеристики континентальної та острівної правових систем, які суттєво різняться у нормативному підході, оцінці правопорушень і механізмах залучення до відповідальності. Сформовані рекомендації ґрунтуються на синтезі міжнародних стандартів, практик добросовісності та досвіду функціонування антикорупційної інфраструктури в Україні, зокрема результатів роботи НАЗК, які засвідчують необхідність цифровізації, інституційної злагодженості та акценту на профілактиці.

Практичну значущість мають сформовані напрями вдосконалення національної антикорупційної політики: від запровадження чіткого правового визначення корупції до створення механізмів превенції на основі внутрішнього контролю, електронного врядування, публічного моніторингу та просвітницьких заходів. Запропоновані рекомендації можуть бути застосовані як у розробці профільного законодавства, так і в побудові корпоративних систем комплаєнсу, уніфікованих етичних стандартів та процедур публічних закупівель.

Наукова новизна дослідження полягає у поєднанні правових підходів із управлінськими стратегіями, що сприяє формуванню системної антикорупційної політики, здатної до адаптації в умовах політичної турбулентності. Запропонована модель дозволяє перейти від нормативної теоретизації до прикладних рішень із врахуванням локального контексту.

Перспективами подальших досліджень є поглиблене вивчення впливу цифрової трансформації на ефективність виявлення корупційних ризиків, а також розробка типології «ситуативної» та «структурної» корупції. Вартим уваги є також аналіз взаємодії індикаторів добросовісності з рівнем політичної стабільності та розвитком громадянського суспільства.

Список використаної літератури

1. Пироговська В., Предместніков О., Гончарук О. Запобігання корупції в органах державної влади України: роль адміністративного права. *Академічні візії*. 2024. Вип. 27. DOI: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10468733>.
2. Glynn E. Corruption in the health sector: A problem in need of a systems-thinking approach. *Frontiers in Public Health*. 2022. Vol. 10. 910073. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.910073>.
3. Horder J. Corporate criminal liability under the Economic Crime and Corporate Transparency Act 2023. *Legal Studies*. 2025. Vol. 45. P. 133–148. DOI: <https://doi.org/10.1017/lst.2024.46>.
4. Organisation for Economic Co-operation and Development. Anti-Corruption and Integrity Outlook 2024. OECD: website. 2024. URL: https://www.oecd.org/en/publications/anti-corruption-and-integrity-outlook-2024_968587cd-en/full-report.html
5. Ірха Ю. Сучасні теоретико-правові підходи до розуміння поняття та сутності корупції в Україні та закордоном. *Наука і правоохорона*. 2025. Т. 3–4. С. 7–21. URL: <https://naukaipravoohorona.navs.edu.ua/index.php/naukaipravoohorona/article/view/1748/1740>

6. Мошнін А. Корупція у сучасній Україні: стан та напрями протидії. *Наукові праці Міжрегіональної Академії управління персоналом. Політичні науки та публічне управління*. 2022. Вип. 2(62). С. 106–110. DOI: [https://doi.org/10.32689/2523-4625-2022-2\(62\)-16](https://doi.org/10.32689/2523-4625-2022-2(62)-16).
7. Гришко В. І., Лисий В. І. Военний стан як чинник зростання корупції в Україні. *Аналітично-порівняльне правознавство*. 2024. № 6. DOI: <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2024.06.88>.
8. Peters A. Human rights and corruption: Problems and potential of individualizing a systemic problem. *International Journal of Constitutional Law*. 2024. Vol. 22. Iss. 2. P. 538–561. DOI: <https://doi.org/10.1093/icon/moae038>
9. Dobson Phillips R., Dávid-Barrett E., Barrington R. Defining Corruption in Context. *Perspectives on Politics*. 2025. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1017/S153759272400286X>.
10. Bellingeri M., Luppi F. Combating Corruption in EU Legislation: An Analysis of Some Aspects of the Commission Proposal for the EU Anti-Corruption Directive. *EuCrIm – The European Criminal Law Associations’ Forum*. 2024. Vol. 18(3). DOI: <https://doi.org/10.30709/eu-crim-2023-025>.
11. Демчук Т. І. Ефективність діяльності антикорупційних органів в Україні. *Актуальні питання юриспруденції*. 2024. № 4(45). С. 32–47. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6473.2024-4.30>.
12. Ярмакі Х., Ярмакі В. Деякі аспекти міжнародного досвіду запобігання та протидії корупції та можливості його використання в Україні. *Південноукраїнський правничий часопис. Протидія злочинності: проблеми практики та науково-методичне забезпечення*. 2024. № 1. С. 64–69. DOI: <https://doi.org/10.32850/sulj.2024.1.10>.
13. Машковська Л., Коваленко-Чукіна І. Правові аспекти нормативно-правової регламентації запобігання корупційним правопорушенням. *Право і суспільство*. 2024. № 4. С. 24–29. DOI: <https://doi.org/10.32842/2078-3736/2024.4.4>.
14. Макурін А. Ефективна публічна влада без корупції: економічна та антикорупційна політики у розбудові правової держави. *Дніпровський науковий часопис публічного управління, психології, права*. 2025. № 1. С. 49–53. DOI: <https://doi.org/10.51547/ppp.dp.ua/2025.1.7>.
15. Transparency International Ukraine. Україна в Індексі сприйняття корупції – 2024. TI Ukraine: вебсайт. 2025. URL: <https://cpi.ti-ukraine.org/#/>
16. Національне агентство з питань запобігання корупції. Звіт 2024 щодо діяльності НАЗК. НАЗК: вебсайт. 2024. URL: <https://nazk.gov.ua/pdfjs/?file=/wp-content/uploads/Pages/89/aa/89aa467f2bc519dc48b9c87dd79559e4bac0d6b1bacda97dab11042fd45627737833879.pdf>

References

1. Pyrohovska, V., Predmestnikov, O., & Honcharuk, O. (2024). Prevention of corruption in public authorities of Ukraine: The role of administrative law. *Academic Visions*, 27. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10468733>
2. Glynn, E. (2022). Corruption in the health sector: A problem in need of a systems-thinking approach. *Frontiers in Public Health*, 10, 910073. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.910073>
3. Horder, J. (2025). Corporate criminal liability under the Economic Crime and Corporate Transparency Act 2023. *Legal Studies*, 45, 133–148. <https://doi.org/10.1017/lst.2024.46>
4. Organisation for Economic Co-operation and Development. (2024). *Anti-Corruption and Integrity Outlook 2024*. OECD. https://www.oecd.org/en/publications/anti-corruption-and-integrity-outlook-2024_968587cd-en/full-report.html
5. Irkha, Yu. (2025). Modern theoretical and legal approaches to understanding the concept and essence of corruption in Ukraine and abroad. *Nauka i Pravoohorona*, 3–4, 7–21. <https://naukaipravoohorona.navs.edu.ua/index.php/naukaipravoohorona/article/view/1748/1740>
6. Moshnin, A. (2022). Corruption in modern Ukraine: State and directions of counteraction. *Scientific Works of the Interregional Academy of Personnel Management. Political Science and Public Administration*, 2(62), 106–110. [https://doi.org/10.32689/2523-4625-2022-2\(62\)-16](https://doi.org/10.32689/2523-4625-2022-2(62)-16)
7. Hryshko, V. I., & Lysyi, V. I. (2024). Martial law as a factor in the growth of corruption in Ukraine. *Analytical and Comparative Jurisprudence*, 6. <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2024.06.88>
8. Peters, A. (2024). Human rights and corruption: Problems and potential of individualizing a systemic problem. *International Journal of Constitutional Law*, 22(2), 538–561. <https://doi.org/10.1093/icon/moae038>
9. Dobson Phillips, R., Dávid-Barrett, E., & Barrington, R. (2025). Defining corruption in context. *Perspectives on Politics*, 1–15. <https://doi.org/10.1017/S153759272400286X>
10. Bellingeri, M., & Luppi, F. (2024). Combating corruption in EU legislation: An analysis of some aspects of the Commission proposal for the EU Anti-Corruption Directive. *EUCrim – The European Criminal Law Associations’ Forum*, 18(3). <https://doi.org/10.30709/eu-crim-2023-025>
11. Demchuk, T. I. (2024). Effectiveness of anti-corruption bodies in Ukraine. *Actual Issues of Jurisprudence*, 4(45), 32–47. <https://doi.org/10.32782/2521-6473.2024-4.30>
12. Yarmaki, Kh., & Yarmaki, V. (2024). Some aspects of international experience in preventing and combating corruption and possibilities of its application in Ukraine. *Southern Ukrainian Legal Journal. Combating Crime: Practice and Methodology*, 1, 64–69. <https://doi.org/10.32850/sulj.2024.1.10>

13. Mashkovska, L., & Kovalenko-Chukina, I. (2024). Legal aspects of regulatory provisions for preventing corruption offenses. *Law and Society*, 4, 24–29. <https://doi.org/10.32842/2078-3736/2024.4.4>

14. Makurin, A. (2025). Effective public authority without corruption: Economic and anti-corruption policies in building a rule-of-law state. *Dnipro Scientific Journal of Public Administration, Psychology, Law*, 1, 49–53. <https://doi.org/10.51547/ppp.dp.ua/2025.1.7>

15. Transparency International Ukraine. (2025). Ukraine in the Corruption Perceptions Index – 2024. <https://cpi.ti-ukraine.org/#/>

16. National Agency on Corruption Prevention. (2024). 2024 Report on NACP activities. <https://nazk.gov.ua/pdfjs/?file=/wp-content/uploads/Pages/89/aa/89aa467f2bc519dc48b9c87dd79559e4bac0d6b1bacda97dab11042fd45627737833879.pdf>

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

С. С. ДИНЧЕВ

аспірант кафедри бізнес-адміністрування
і менеджменту зовнішньоекономічної діяльності
Запорізький національний університет
ORCID: 0009-0009-9345-9796

ДОСВІД УРЯДУ ХОРВАТІЇ У РЕІНТЕГРАЦІЇ ТИМЧАСОВО ОКУПОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

У даній статті досліджено історичний та управлінський досвід уряду Республіки Хорватія щодо реінтеграції тимчасово окупованих територій після збройного конфлікту між 1991–1995 років, що було реалізовано за умов обмеженого збройного конфлікту між Сербією (як наступницею Республіки Югославії) та Хорватією, а також активною участю міжнародної спільноти під егідою Організації Об'єднаних Націй.

В основу дослідження закладається ідея аналогії передумов конфлікту між Сербією і Хорватією, стосовно приналежності певних територій та відповідних способів розрішення конфлікту з метою забезпечення населення від економічної та гуманітарної кризи.

На основі аналізу нормативно-правової бази, законів, рішень уряду Хорватії, програм міжнародної допомоги та діяльності місії ООН розкрито особливості поетапного відновлення державного управління, безпеки, місцевого самоврядування, мережі соціально-економічних зв'язків і правового порядку в регіонах, що тривалий час перебували поза юрисдикцією центральної влади, проте під управлінням невизначених інституцій, створених окупаційною адміністрацією. Особливу увагу приділено реалізації Ердутської угоди, створенню Тимчасової адміністрації ООН для Східної Славонії, Бараньї та Західного Срему (UNTAES), а також ролі місцевого самоврядування у процесі мирної інтеграції.

Визначено суттєві відмінності між ситуаціями в Хорватії та в Україні, які зумовлені різним ступенем ескалації, потужністю військової дії та протидії, ядерною небезпекою, відсутністю серйозних реальних релігійних, культурних та етнічних протиріч між населенням територій.

Показано, що успіх хорватської моделі був зумовлений поєднанням політичної волі, дипломатичної підтримки, чіткої поетапності заходів, а також соціальної політики, спрямованої на примирення і повернення населення. Зроблено висновок, що досвід Хорватії має прикладне значення для України: він демонструє необхідність формування системного підходу до післявоєнної реінтеграції, заснованого на балансі безпекових, правових та гуманітарних механізмів, участі міжнародних партнерів і відновленні довіри до інститутів влади.

Ключові слова: реінтеграція, Хорватія, державне управління, Ердутська угода, UNTAES, міжнародні місії, постконфліктне врегулювання, Україна.

S. S. DYNCHEV

Postgraduate Student at the Department of Business Administration
and Foreign Economic Activity Management
Zaporizhzhia National University
ORCID: 0009-0009-9345-9796

EXPERIENCE OF THE CROATIAN GOVERNMENT IN THE REINTEGRATION OF TEMPORARILY OCCUPIED TERRITORIES

This article examines the historical and managerial experience of the Government of the Republic of Croatia in the reintegration of temporarily occupied territories after the armed conflict between 1991 and 1995, which was implemented under the conditions of a limited armed conflict between Serbia (as the successor of the Republic of Yugoslavia) and Croatia, as well as the active participation of the international community under the auspices of the United Nations.

The study is based on the idea of analogies of the preconditions of the conflict between Serbia and Croatia, regarding the ownership of certain territories and appropriate methods of conflict resolution in order to protect the population from economic and humanitarian crises.

Based on the analysis of the regulatory framework, laws, decisions of the Croatian government, international assistance programs and the activities of UN missions, the features of the gradual restoration of public administration, security, local self-government, a network of socio-economic ties and legal order in regions that were for a long time outside the jurisdiction of the central government, but under the management of unspecified institutions created by the occupation administration, are revealed. Special attention is paid to the implementation of the Erdut Agreement, the

creation of the UN Interim Administration for Eastern Slavonia, Baranja and Western Sylvania (UNTAES), as well as the role of local self-government in the process of peaceful integration.

Significant differences between the situations in Croatia and Ukraine are identified, which are due to different degrees of escalation, the power of military action and counteraction, nuclear danger, the absence of serious real religious, cultural and ethnic contradictions between the population of the territories.

It is shown that the success of the Croatian model was due to a combination of political will, diplomatic support, a clear phasing of measures, as well as social policies aimed at reconciliation and the return of the population. It is concluded that the experience of Croatia has practical significance for Ukraine: it demonstrates the need to form a systemic approach to post-war reintegration, based on a balance of security, legal and humanitarian mechanisms, the participation of international partners and the restoration of trust in government institutions.

Key words: reintegration, Croatia, public administration, Erdut Agreement, UNTAES, international missions, post-conflict recovery, Ukraine.

Постановка проблеми

Проблематика реінтеграції тимчасово окупованих територій набуває особливої актуальності для України у контексті триваючої війни. Незважаючи на поступову втрату території та фізичну перевагу ворога у основних компонентах військової сили триває війна на виснаження, яка спрямована на руйнування економічного потенціалу та соціальної стабільності РФ. Метою цієї стратегії є створення всередині РФ ситуації, в якій існування та співіснування певних політичних еліт, так і основної маси населення у звичний спосіб стане неможливим. Зростання напруги зумовить появу політичних сил, які разом з їх симпатиками зруйнують існуючу тиранію. Враховуючи моделі інших країн та власний досвід України, можна очікувати та стимулювати появу суттєвих зрушень в системі публічного управління РФ та перспективу відновлення контролю на міжнародно визнаною територією України. Це можливо за умови ефективного державного управління, стабільної публічної влади та соціально-економічного життя потребує глибокого аналізу зарубіжного досвіду. Головною справою в цьому процесі є збереження прав людей, повагу до населення, створення безпечного та комфортного середовища, що зумовить довіру та підтримку нових органів державної влади та місцевого самоврядування.

Однією з найбільш успішних моделей є – хорватська, реалізована під егідою ООН у 90-ті роки, тому є сенс до вивчення практичних підходів та наукового обґрунтування з ймовірною можливістю застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Серед зарубіжних дослідників варто відзначити Д. П. Ледераха (John Paul Lederach), який розробив концепцію «побудови миру знизу вгору», що стала теоретичною основою для мирних процесів на Балканах. М. К. (Mary Kaldor) у своїй праці “New and Old Wars” (2012) розглядає балканські конфлікти як приклад «нових воєн», де поєднуються етнічні, політичні та економічні чинники. Д. Гоу (James Gow) та І. Банак (Ivo Banac) досліджували процеси хорватського державотворення і вплив міжнародних акторів на врегулювання конфліктів у колишній Югославії.

З точки зору адміністративної практики та науки державного управління, важливими є роботи К. Хілла (Christopher Hill) та Р. П. (Roland Paris), які аналізували стратегії постконфліктної стабілізації та роль ООН у формуванні легітимних адміністрацій на звільнених територіях.

В українській науці значний внесок зробили О. Костенко, В. Ліпкан, І. Рижов, О. Гуменюк, С. Серьогін, які розкривають аспекти державного управління у сфері національної безпеки, регіональної політики та реінтеграції тимчасово окупованих територій. Особливу увагу у їхніх роботах приділено питанням децентралізації, відновлення довіри до органів влади та застосування міжнародного досвіду у формуванні української політики відновлення.

Науковці І. Романюк та Л. Шевчук аналізують інституційні аспекти відновлення контролю над територіями, використовуючи приклади Хорватії, Боснії і Герцеговини, Косово та Східного Тимору. Їхні висновки підтверджують, що ефективна реінтеграція можлива лише за умови балансу безпекових і гуманітарних підходів, особливо при первинній реінтеграції, тобто у момент ліквідації окупаційних адміністрацій та встановлення законних органів влади та місцевого самоврядування, реалізація конституційних прав громадян та публічного управління, передбаченого Конституцією.

Таким чином, більшість досліджень сходяться на тому, що хорватський досвід є однією з найуспішніших моделей мирної реінтеграції в Європі, а його вивчення має практичне значення для розроблення стратегій відновлення територіальної цілісності України.

Формулювання мети дослідження

Мета статті полягає у дослідженні механізмів та практичних рішень, використаних урядом Хорватії у процесі повернення окупованих територій, і визначенні можливостей їх адаптації до українських реалій.

Викладення основного матеріалу дослідження

Історичні передумови та причини конфлікту були закладені в штучність організації системи державного управління та устрою самої Югославії. Ця країна, що утворена на руїнах післявоєнної Європи, в результаті домовленостей та узгодження інтересів великих країн-переможців у війні. Наявність великої різноманітності проблем та амбівалентності територій повинна була реалізуватись у сепаратистські рухи, що зруйнували країну.

Таблиця 1

Основні дослідники проблематики реінтеграції та постконфліктного врегулювання

№	Дослідник	Країна	Основна ідея / внесок	Ключова праця
1	John Paul Lederach	США	Концепція «побудови миру знизу вгору»; роль локальних громад у відновленні державності	Building Peace: Sustainable Reconciliation in Divided Societies (1997)
2	Mary Kaldor	Велика Британія	Теорія «нових воєн»; поєднання політичних і етнічних конфліктів у постмодерному світі	New and Old Wars: Organized Violence in a Global Era (2012)
3	James Gow	Велика Британія	Аналіз воєн у колишній Югославії; політична трансформація Хорватії	Triumph of the Lack of Will (1997)
4	Ivo Banac	Хорватія/ США	Історія хорватської державності; взаємодія політики та національної ідентичності	The National Question in Yugoslavia (1984)
5	Roland Paris	Канада	Критика підходів «миротворчості через лібералізацію»; важливість інституційної стабільності	At War's End: Building Peace after Civil Conflict (2004)
6	Christopher Hill	Велика Британія	Роль міжнародних організацій у постконфліктній стабілізації	The European Union and the Politics of Crisis Management (2004)
7	О. Костенко	Україна	Механізми правового забезпечення реінтеграції; децентралізаційний аспект	Державне управління у сфері національної безпеки України (2018)
8	В. Ліпкан	Україна	Концепція національної безпеки та реінтеграції територій у постконфліктний період	Система національної безпеки України (2016)
9	С. Сergygin	Україна	Управління територіями з особливим статусом; регіональна політика	Механізми державного управління розвитком регіонів України (2019)
10	І. Романюк, Л. Шевчук	Україна	Порівняльний аналіз реінтеграційних моделей (Хорватія, Боснія, Косово)	Реінтеграція тимчасово окупованих територій: міжнародний досвід (2021)

Після розпаду Югославії у 1991 році частина територій Хорватії була окупована сербськими воєнізованими формуваннями, які проголосили так звану «Республіку Сербська Країна». Конфлікт призвів до загибелі понад 20 тисяч осіб і масового переміщення населення.

У 1992 році Рада Безпеки ООН ухвалила рішення про створення миротворчої місії UNPROFOR. Однак місія мала обмежений мандат, що унеможливило повне відновлення суверенітету Хорватії.

Ситуація змінилася лише у 1995 році, коли хорватська армія провела успішні операції «Блискавка» і «Буря», що дозволило повернути більшу частину територій під контроль уряду.

Інституційно-правова модель реінтеграції територій є найбільш ефективною при найбільш ймовірному розвитку подій.

Ключовим документом мирного врегулювання стала Ердутська угода (12 листопада 1995 року), яка передбачала створення Тимчасової адміністрації ООН для Східної Славонії, Бараньї та Західного Срему (UNTAES). Її завданням було забезпечення перехідного управління, роззброєння, демілітаризації, формування поліції, судів та органів місцевого самоврядування.

Уряд та Парламент Хорватії ухвалили низку законів, що забезпечували як порядок так і організаційний механізм, серед них:

- Закон про амністію (1996 р.), що передбачав амністію всіх, в тому числі колаборантів (за виключенням військових злочинців).
- Закон про місцеве самоврядування та управління, який передбачав спеціальний порядок створення органів управління.
- Закон про відшкодування збитків жертвам війни, який передбачав експертизу, встановлення ціни та справедливості претензій громадян.
- Програму повернення біженців і відбудови інфраструктури, яка профінансована Світовим Банком та урядами деяких країн.

Завдяки цим заходам до кінця 1998 року території Східної Хорватії були повністю інтегровані до правового поля держави. Роль міжнародних посередників стала визначальною, оскільки були враховані інтереси всіх потенційно конфліктних країн, а мирна інтеграція Східної Славонії стала можливою завдяки активній участі ООН, ОБСЄ, Європейського Союзу та НАТО.

Так, ООН здійснювала адміністративний контроль і безпековий нагляд (UNTAES). ОБСЄ забезпечувала моніторинг дотримання прав людини та поведження зі зброєю.

ЄС надавав фінансову допомогу для відбудови та започаткував переговори про майбутню інтеграцію Хорватії до європейського простору.

Ключовим аспектом стало поєднання дипломатії, правових гарантій та економічних стимулів, що дозволило зменшити соціальну напругу.

Економічна та соціальна реінтеграція реалізувалась у контексті співпраці міжнародних організацій, уряду Хорватії та активних громадських організацій.

Уряд Хорватії запровадив програму економічної компенсації для мешканців реінтегрованих регіонів, відновив роботу комунальних підприємств, залучив міжнародні кредити на інфраструктурні проекти.

Важливою складовою стало повернення біженців, яке проводилось поступово – із забезпеченням відновлення документів, записів у реєстрах житла та амністії. В цілому ж, соціальна політика була спрямована на примирення, толерантність і створення єдиного політичного простору.

Україна може використати хорватський досвід у таких напрямках:

- створення тимчасових адміністрацій на деокупованих територіях;
- впровадження програм амністії для осіб, не причетних до тяжких злочинів;
- твідновлення органів місцевого самоврядування за єдиними стандартами;
- залучення міжнародних партнерів для нагляду за дотриманням прав людини;
- розроблення економічних та податкових стимулів для інвесторів у постконфліктних регіонах.

Попри часті порівняння з хорватською моделлю, реінтеграція тимчасово окупованих територій України має суттєві відмінності, обумовлені історичним, політичним і геополітичним контекстом.

Війна в Хорватії тривала близько п'яти років (1991–1995) і охоплювала приблизно третину території країни. В Україні ж бойові дії мають значно більший масштаб, охоплюючи кілька областей, морський регіон, а також мають системний характер гібридної агресії з боку ядерної держави. Це ускладнює пряме відтворення хорватського сценарію.

Хорватія мала більш сприятливий зовнішньополітичний контекст – підтримку ООН, ЄС та НАТО, які забезпечували політичне посередництво та миротворчу місію (UNTAES). Україна ж діє у середовищі, де агресор є постійним членом Ради Безпеки ООН, що фактично блокує міжнародно-правові механізми. Це вимагає створення альтернативних форматів співпраці – таких як «Кримська платформа» та розширене партнерство з НАТО.

У Хорватії під час конфлікту діяла унітарна, відносно централізована система влади, яка забезпечувала швидке ухвалення рішень. Україна, навпаки, знаходиться у процесі децентралізації, що ускладнює координацію між державними і місцевими органами при плануванні відновлення.

У хорватському конфлікті значну роль відіграли етнічні поділи між хорватами та сербами, тоді як в Україні конфлікт має передусім політичний і безпековий характер. Тому процес реінтеграції в Україні повинен спиратися не на етнічне примирення, а на відновлення соціальної довіри, справедливості та функціонування правової держави.

Після хорватського конфлікту держава отримала можливість швидко відновити зруйновану інфраструктуру завдяки масштабним інвестиціям ЄС. Україна ж потребує відновлення сотень міст і сіл, об'єктів критичної інфраструктури, а також формування довгострокових фінансових інструментів відновлення, зокрема через механізми конфіскації російських активів.

Хорватія не мала справи з тотальною інформаційною війною. Український контекст включає постійні кібератаки, дезінформацію та пропаганду, що вимагає розробки комплексної стратегії реінтеграції інформаційного простору.

Хорватський досвід є цінним як структурна модель – зокрема, у частині етапного переходу від військової операції до мирної адміністрації, амністії та інтеграції місцевого населення. Водночас Україна має створити власну, більш складну систему відновлення та реінтеграції, яка врахує не лише безпековий і політичний вимір, але й гуманітарний, цифровий та інформаційний аспекти поствоєнного розвитку.

Висновки

Успіх хорватської моделі забезпечили три чинники: чітка державна стратегія, міжнародна підтримка та етапність виконання мирного плану.

Для України цей досвід може стати основою для формування власної доктрини мирної реінтеграції, що поєднує безпекові, управлінські й гуманітарні аспекти у єдину державну політику.

Досвід уряду Хорватії у процесі реінтеграції окупованих територій є показовим прикладом поєднання політичної волі, міжнародної підтримки та комплексного управління постконфліктним відновленням. Реінтеграція хорватських земель, здійснена через комбінацію військово-політичних і дипломатичних засобів, засвідчила, що відновлення територіальної цілісності можливе лише за умови консолідації державних інститутів, національної єдності та ефективної зовнішньої політики.

Важливо, що ключовим чинником успіху Хорватії стала інституціональна готовність держави до переходу від війни до миру – створення спеціальних адміністрацій, проведення амністій, поступове повернення біженців та інтеграція місцевих громад у єдиний правовий простір. Застосування миротворчої місії ООН (UNTAES) забезпечило нейтралізацію збройних формувань та контрольований перехід територій під юрисдикцію Загреба без масового насильства.

Для України хорватський досвід є не рецептом, а джерелом стратегічних орієнтирів. Українська держава перебуває у складнішому безпековому та геополітичному середовищі, проте може використати хорватську модель як основу для побудови власної системи поетапної реінтеграції.

Зокрема, варто адаптувати такі елементи:

- формування тимчасових адміністрацій на деокупованих територіях;
- забезпечення перехідного правосуддя та механізмів суспільного примирення;
- відновлення інфраструктури й системи публічних послуг у партнерстві з ЄС і міжнародними організаціями;
- створення комплексної інформаційної політики для відновлення довіри та національної ідентичності.

Список використаної літератури

1. Костенко О. Державне управління у сфері національної безпеки України. Київ : НАДУ, 2018.
2. Ліпкан В. Система національної безпеки України. Київ : Юрінком Інтер, 2016.
3. Сєрьогін С. М. Механізми державного управління розвитком регіонів України. Запоріжжя : ЗНУ, 2019.
4. Романюк І., Шевчук Л. Реінтеграція тимчасово окупованих територій: міжнародний досвід. Київ : НІСД, 2021.
5. United Nations. UNTAES Final Report: Peaceful Reintegration of Eastern Slavonia. New York : United Nations Publications, 1998.
6. European Commission. EU Enlargement and Post-Conflict Reconstruction: The Case of Croatia. Brussels : EC Working Papers, 2015.
7. Croatian Bureau of Statistics. Statistical Yearbook of the Republic of Croatia. Zagreb, 2023.
8. Ministry of Foreign and European Affairs of Croatia. National Strategy for Post-War Recovery and Reintegration. Zagreb, 2002.
9. Офіс Президента України. Стратегія деокупації та реінтеграції тимчасово окупованих територій (проект). Київ, 2023.
10. Верховна Рада України. Закон України «Про забезпечення прав і свобод громадян на тимчасово окупованих територіях України» № 1207-VII від 15.04.2014.
11. UNDP. Post-Conflict Peacebuilding and Recovery: Lessons from Croatia and Bosnia. Geneva : UNDP, 2020.
12. World Bank. Building Back Better: Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment. Washington D.C., 2023.
13. DCAF. Security Sector Reform in Post-Conflict States: The Croatian Model. Geneva : DCAF Publications, 2019.

References

1. Kostenko, O. (2018). Derzhavne upravlinnia u sferi natsionalnoi bezpeky Ukrainy. Kyiv: NADU. [in Ukrainian].
2. Lipkan, V. (2016). Systema natsionalnoi bezpeky Ukrainy. Kyiv: Yurinkom Inter. [in Ukrainian].
3. Serohin, S. (2019). Mekhanizmy derzhavnoho upravlinnia rozvytkom rehioniv Ukrainy. Zaporizhzhia: ZNU. [in Ukrainian].
4. Romaniuk, I., & Shevchuk, L. (2021). Reintehratsiia tymchasovo okupovanykh terytorii: mizhnarodnyi dosvid. Kyiv: NISD. [in Ukrainian].
5. United Nations. (1998). UNTAES Final Report: Peaceful Reintegration of Eastern Slavonia. New York: United Nations Publications.
6. European Commission. (2015). EU Enlargement and Post-Conflict Reconstruction: The Case of Croatia. Brussels: EC Working Papers.
7. Croatian Bureau of Statistics. (2023). Statistical Yearbook of the Republic of Croatia. Zagreb.
8. Ministry of Foreign and European Affairs of Croatia. (2002). National Strategy for Post-War Recovery and Reintegration. Zagreb.
9. Office of the President of Ukraine. (2023). Stratehiia deokupatsii ta reintehratsii tymchasovo okupovanykh terytorii. Kyiv. [in Ukrainian].
10. Verkhovna Rada of Ukraine. (2014). Zakon Ukrainy “Pro zabezpechennia prav i svobod hromadian na tymchasovo okupovanykh terytoriiakh Ukrainy” No.1207-VII. Kyiv. [in Ukrainian].
11. UNDP. (2020). Post-Conflict Peacebuilding and Recovery: Lessons from Croatia and Bosnia. Geneva: UNDP.
12. World Bank. (2023). Building Back Better: Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment. Washington D.C.
13. DCAF. (2019). Security Sector Reform in Post-Conflict States: The Croatian Model. Geneva: DCAF Publications.

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 19.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

O. M. OLIINYK

Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor
Zaporizhzhia National University
ORCID: 0000-0003-0511-7681

CONCEPTUAL MODEL OF STATE DIGITAL TRACEABILITY IN THE FOOD INDUSTRY IN THE CONTEXT OF ELECTRONIC AND QUICK COMMERCE DEVELOPMENT UKRAINE

Within the framework of the conducted study, the digital transformation processes in the food industry, driven by the rapid development of electronic and quick commerce, were comprehensively analyzed. Based on this analysis, a holistic conceptual model of state digital traceability was developed capable of replacing fragmented regulatory approaches with algorithmic governance logic. The key structural elements of the digital regulatory architecture were systematized, and the unified model «Trek.Food Government» was presented as a central institutional platform that integrates the functions of registration, digital authorization, control, accounting, and incident response. A four-block functional structure of the system was outlined, ensuring end-to-end digital verification of market participants, logistics chains, and product batches, while implementing a new paradigm of behavioral state oversight, where the reputational weight of an actor acquires legally relevant significance. The analytical foundations for transitioning from traditional inspection-based regulation to a risk-oriented model were revealed, wherein automated digital decisions are made based on algorithmically validated deviations recorded at the level of a participant's digital profile, QR-batch, or critical supply chain event. The methodological understanding of state regulatory presence was expanded from a controlling body to an adaptive digital ecosystem that performs profiling, verification, and real-time response based on data integrated with the services «Diia.Business», «Diia.Inspector» and «Diia.Signature». An institutional interaction contour between business, the state, and the consumer was presented, grounded not in formal control, but in digital accountability and transparency through blockchain identification technologies, QR labeling, RFID tracking, smart contracts, and dynamic batch-level digital passports. Institutional and regulatory-technical barriers to system implementation were analyzed, including the legal codification of digital artifacts, interoperability of data formats, and the necessity of deploying a national IoT infrastructure in the food logistics sector. It was substantiated that the proposed model provides the foundation for transitioning from vertically centralized state control to a polycentric, networked, and digitally algorithmized governance system, capable of ensuring not only effective oversight but also fostering trust, safety, and sustainable development of Ukraine's digital food economy.

Key words: digitalization, traceability, food industry, government regulation, e-commerce, fast commerce, QR, RFID, SMART contracts, IoT.

O. M. ОЛІЙНИК

кандидат філософських наук, доцент
Запорізький національний університет
ORCID: 0000-0003-0511-7681

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ДЕРЖАВНОЇ ЦИФРОВОЇ ПРОСТЕЖУВАНOSTІ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ В КОНТЕКСТІ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ШВИДКОЇ КОМЕРЦІЇ УКРАЇНИ

У межах проведеного дослідження всебічно проаналізовано цифрові трансформаційні процеси у сфері харчової промисловості, зумовлені стрімким розвитком електронної та швидкої комерції, на основі чого сформовано цілісну концептуальну модель державної цифрової простежуваності, здатну замінити фрагментарні регуляторні підходи логікою алгоритмічного управління. Систематизовано ключові структурні елементи цифрової регуляторної архітектури та представлено уніфіковану модель «Трек.Food Government» як центральну інституційну платформу, що об'єднує функції реєстрації, цифрової авторизації, контролю, обліку та інцидентного реагування. Виокремлено чотириблочну функціональну конструкцію системи, яка забезпечує наскрізну цифрову верифікацію суб'єктів ринку, логістичних каналів і партій продукції та реалізує нову парадигму поведінкового державного нагляду, де репутаційна вага суб'єкта набуває юридично релевантного значення. Розкрито аналітичні засади переходу від традиційного інспекційного регулювання до ризик-орієнтованої моделі, в якій автоматизовані цифрові рішення приймаються на підставі алгоритмічно підтверджених відхилень,

зафіксованих на рівні цифрового профілю учасника, QR-партії або критичної події в ланцюгу постачання. Розширено методологічне уявлення про державну регуляторну присутність від органу-контролера до адаптивної цифрової екосистеми, яка здійснює профілювання, верифікацію та реагування в реальному часі на основі даних, інтегрованих із сервісами «Дія.Бізнес», «Дія.Інспектор» та «Дія.Підпис». Представлено інституційний контур взаємодії між бізнесом, державою та споживачем, в основі якого лежить не формальний контроль, а цифрова відповідальність і прозорість через технології блокчейн-ідентифікації, QR-маркування, RFID-трекінгу, SMART-контрактів та партійного динамічного цифрового паспорту. Проаналізовано інституційні та нормативно-технічні бар'єри впровадження системи, зокрема юридичну кодифікацію цифрових артефактів, інтероперабельність форматів даних та необхідність запуску національної IoT-інфраструктури у сфері харчової логістики. Обґрунтовано, що запропонована модель створює підґрунтя для переходу від вертикально централізованого державного контролю до поліцентричного, мережевого й цифрово-алгоритмізованого управління, здатного забезпечити не лише ефективність нагляду, а й умови для довіри, безпеки та сталого розвитку цифрової харчової галузі України.

Ключові слова: цифровізація, простежуваність, харчова галузь, державне регулювання, електронна комерція, швидка комерція, QR, RFID, SMART-контракти, IoT.

Formulation of the problem

In the current context of food market transformation driven by the rapid development of electronic and fast commerce, the issue of ensuring digital traceability in the food industry is gaining strategic importance both for state regulation and for guaranteeing the safety and quality of food products. The shift in consumer behavior toward online sales channels, the emergence of hybrid logistics models, and the growing volume of cross-border trade are creating new challenges for systems of identification, control, and verification of product origin at every stage of its movement. In this context, digital traceability can no longer be viewed solely as an intra-industry or technical mechanism, as it requires a systematic rethinking through the lens of integration with e-commerce platforms, national registries, logistics providers, and state control authorities. International practice demonstrates that effective traceability systems (such as in the EU and South Korea) not only ensure supply chain transparency but also increase trust in domestic producers, promote exports, and strengthen food security. However, in Ukraine, such a model is still in a fragmented implementation stage, which necessitates the development of a comprehensive conceptual architecture for digital traceability capable of uniting governmental, business, and technological interests within the framework of the digital economy.

Analysis of recent achievements and publications

In the context of modern research on digital traceability in the supply chains of the food industry, the presented conceptual model of state digital traceability in the food industry of Ukraine stands out as an innovative study that, for the first time, proposes a holistic architecture of digital state regulation in the rapidly developing sphere of electronic and fast commerce. In contrast to existing academic works, which are mainly focused on the technological aspects of individual solutions (Blockchain, RFID, IoT, etc.) or are limited to empirical cases of implementing specific digital tools in production processes, this model integrates the functionality of digital public administration, algorithmic oversight, legally significant digital reputation, and institutional interaction between business, consumer, and the state through a unified integration platform «Trek.Food Government». The analysis of modern publications, particularly the works of Ellahi, Reddy, Charlebois, Lukacs, Verna, Corallo, Mishra, and others, demonstrates scientific interest in the digitalization of food supply chains, but also outlines the limitations of existing approaches in several directions. For example, the study by Ellahi R.M., Wood L.C., Bekhit A.E. [1] provides a systematic review of blockchain solutions in food chains, identifying transparency, safety, and traceability as the main directions, but remains within the technological discourse, not addressing issues of public administration or regulatory implementation. The work of Reddy P., Kurnia S., Tortorella G.L. [2] proposes a five-dimensional model of digital traceability (DFSCT), but does not consider state involvement or integration into national information systems. The comparative study by Charlebois S., Latif N., Ilahi I., Sarker B., Music J., Vezeau J. [3] covers the experience of OECD countries in the field of digital traceability, focusing on regulatory and legal differences, but lacks the component of centralized institutional management or platform-based digital oversight. The work of Lukacs M., Toth F., Horvath R., Solymos G., Alpár B., Varga P., Kertesz I., Gillay Z., Baranyai L., Felfoldi J., et al. [4] demonstrates the possibilities of combining NIRS, IoT, RFID, and blockchain through a specific product case, but is limited to the production point in the chain and does not include comprehensive state interaction or algorithmization of inspection functions. Similarly, the study by Verna E., Genta G., Galetto M. [5] focuses on improving the quality of traceability in the food industry, but points to fragmented implementation of digital tools and cultural unpreparedness for their full-scale application. The work of Corallo A., Paiano R., Guido A.L., et al. [6] presents an IoT framework for transparency in the agri-food chain, but is more of an engineering proposal than a conceptual vision of digital state regulation. The work of Mishra N., Mistry S., Choudhary S., et al. [7] offers blockchain-based solutions in response to food scandals in India, focusing on the technical implementation of QR-codes and decentralized ledgers, but lacks a systematic analysis of regulatory integration or adaptive oversight. Thus, all the analyzed studies form a valuable basis for understanding the technical potential of digital technologies in the field of traceability, but do not go beyond the technological or applied

level. In this context, the proposed conceptual model is the first attempt to create an algorithmized, digitally institutionalized system of state governance that considers the full cycle of digital verification of entities, products, and logistics channels in real time, relying on reputation mechanisms, platform-based interaction, and integration with national services «Diia.Business», «Diia.Inspector», «Diia.Sign». At the same time, this model takes into account the barriers to implementation, including the codification of digital artifacts, the need for a national IoT infrastructure, and the interoperability of digital formats. Therefore, the absence of similar comprehensive solutions in other academic works indicates that this development opens a new paradigm of state presence from a supervisory body to an adaptive digital ecosystem focused on transparency, trust, sustainable development, and effective risk management in the food industry.

Purpose is article

Develop of an architectural conceptual model of digital traceability in the food industry, which integrates state registries, digital e-commerce platforms, logistics systems, and business infrastructure.

Presentation of the main material

For the seamless integration of digital tools and mechanisms (SAP, MES, TMS, POS systems, QR-codes [8], RFID tags [9], Blockchain [10], SMART contracts [10], laboratory systems, digital certification systems, AI analytics, IoT sensors [11], GPS trackers [11], state monitoring systems, integration with «Diia», Big Data [12], open API, and public oversight platforms) into the future state regulation of food industry enterprises in the context of electronic and rapid commerce, it is necessary to develop a unified state digital platform, «Trek.Food Government». This platform will accumulate registration data, digital accounting mechanisms, control, role attribution, and will interact with the «Diia.Business» and «Diia.Inspector» platforms as well as with external state control services in the field of food safety (see Fig. 1).

According to Fig. 1, the central functional node of this model is the unified state digital platform for food product traceability, «Trek.Food Government», which accumulates registration data, digital accounting mechanisms, control, role attribution, and interacts with the «Diia.Business» and «Diia.Inspector» platforms as well as external state services. The logic of this system is built according to the principle of digital administrative sequencing, which covers four functional modules: 1) Registration; 2) Authorization; 3) Digital Accounting; 4) Digital Control.

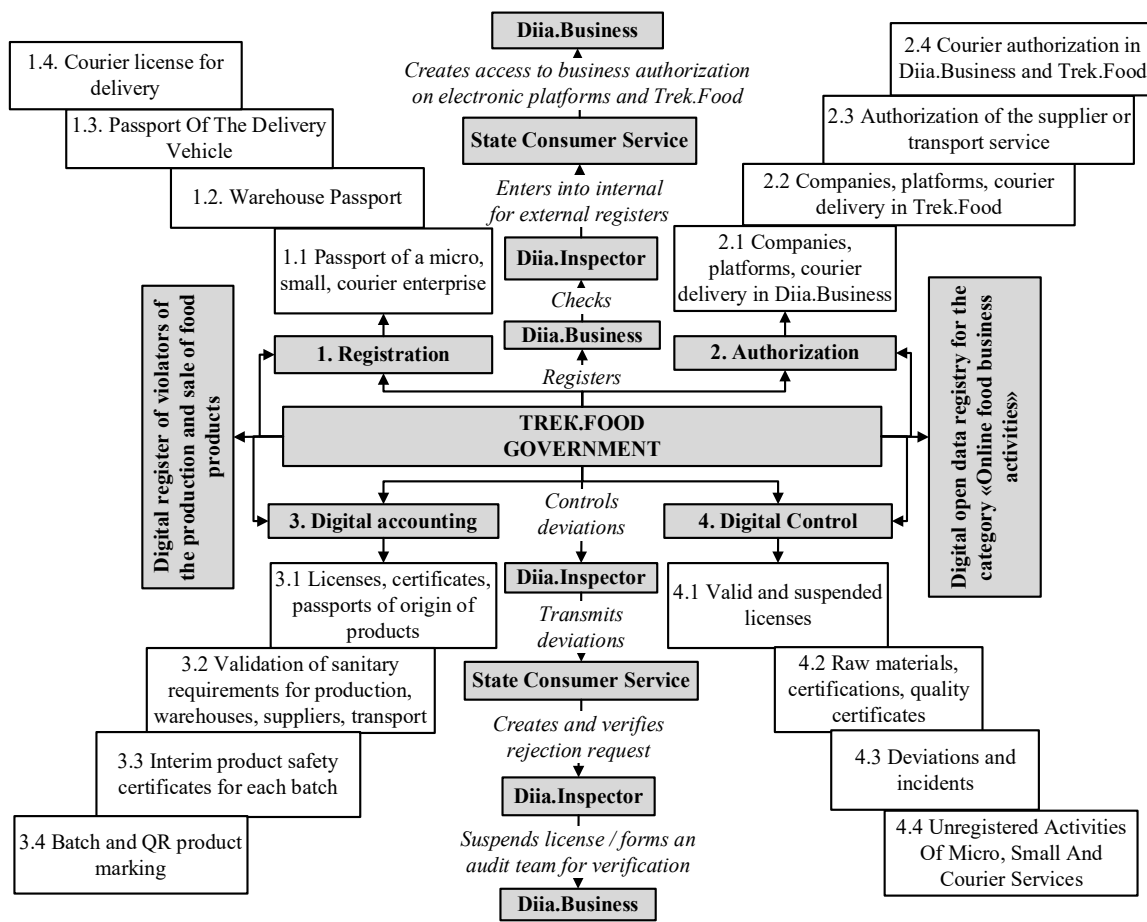


Fig. 1. Functional-procedural model of the «Trek.Food Government» system for registration, integration, accounting, and control of relevant food products in the context of electronic and fast commerce

Source: developed by the author

Each module contains a set of procedures executed both through the public digital services of «Diia» and through automated digital interfaces of executive authorities.

The first «Registration» block is responsible for the digital passporting of micro, small, and medium-sized food enterprises, courier services, warehouses, transport vehicles, and couriers. A key feature is the possibility of data entry into external registries through an authorized state service, enabling the unification of procedures with existing state registries. Importantly, «Diia.Business» serves as the primary system entry interface, where entrepreneurs gain access to electronic platforms and «Trek.Food Government».

The second block, «Authorization», involves confirming the digital status of micro, small, and medium-sized food enterprises, and particularly courier services, couriers, transport service providers, and logistics operators, which is critical for the rapid commerce model where delivery can be carried out by small, non-formalized actors. Authorization serves as a legitimization procedure in the digital domain, transitioning informal businesses into a regulated digital environment without complicating the process. Notably, courier or service confirmation can occur without physical intervention through algorithmic data analysis, significantly reducing the transaction costs of regulation.

The third block, «Digital Accounting», functions as a tool for maintaining registers of licenses, certificates, passports, and the recording of compliance with sanitary requirements. It is linked to digital traceability, implemented through integration with «QR-traceability», certification, smart contracts, and logistics trackers. An innovative element of this block is the creation of batch accounting with «QR-labeling», allowing tracking not only by entities but by each specific batch of goods or deliveries. This solution enables the implementation of the principle of reversible control, particularly when detected deviations automatically trigger procedural investigations or license suspensions.

The fourth block, «Digital Control», includes actions executed through «Diia.Inspector», particularly in the area of automatic license verification, service activity checks, and the creation and verification of digital files and certificates. A unique feature is the possibility of automatic license revocation, meaning violations recorded within the digital system can initiate legally significant administrative decisions without inspection procedures. This logic aligns with the modern «predictive oversight» concept used in leading countries to increase regulatory efficiency while reducing administrative burdens. Additionally, the lower segment of the model includes a mechanism linking activities to sectoral groups, risk categories, and typical violations, enabling the classification of participants by the degree of potential threat or significance, creating a foundation for risk-oriented regulation.

Thus, this system registers, controls, and performs dynamic profiling functions, enabling the state to respond flexibly to changes in market participant behavior. Conceptually, this model represents a governance symbiosis between the «Diia» digital public platforms, digital state control interfaces, and market-generated data. This structure enables a shift from linear regulatory logic to data-driven cybernetic governance, where each administrative action is based on algorithmic conclusions, and each decision is verified, justified, and transparent. Consequently, this model will simplify administrative procedures and transform the approach to state regulation, shifting it from a domain of distrust and constant inspections to a format of algorithmic cooperation where compliant businesses gain faster market access, while violators are automatically detected and blocked by the system without human intervention.

Having presented the functional and procedural model of the «Trek.Food Government» system (Fig. 2), we will develop the overall concept of the digital transformation of the state food traceability system in the context of the rapid development of electronic and quick commerce (see Fig. 2).

The presented concept of the digital transformation of the state food traceability system in the context of electronic and rapid commerce (Fig. 2) forms a four-segment configuration centered around «Diia.Business», «Diia.Inspector», «Diia.Signature», and «Trek.Food», embodying the principles of polycentric governance, where key functions are distributed among digital state platforms, logistics nodes, business actors, and consumer interfaces, while management accountability acquires a networked nature.

Structurally, the model is built as a functionally conditioned convergent space where each of the four blocks plays an autonomous yet integrated role in ensuring traceability, namely: The upper segment focuses on the registration of electronic commerce entities, risk labeling through an open reputation system, and the digitalization of production by connecting to «Trek.Food» as the central regulatory hub; The right segment is responsible for intelligent logistics, introducing registers of warehouses, transport vehicles, digital delivery channels, and «QR batch identification» blocks; The lower segment is responsible for technological product traceability through the integration of blockchain infrastructure, HACCP, RFID technologies, verified certificates, and digital product passports. The left segment is responsible for regulating rapid commerce, specifically for the digital recording of courier services, pick-up points, transportation, and compliance with sanitary requirements for mobile distribution. The institutional vertical is integrated into the system via the «Diia» platform, which performs a technical-administrative function and serves as a state trust interface. Through «Diia.Business», electronic legitimization of business operators is implemented; «Diia.Inspector» facilitates remote, intelligent oversight; and «Diia.Signature» provides digital verification of transactions and regulatory documents. As a result, the regulatory infrastructure acquires the characteristics of a dispersed administrative organism, operating through digital algorithms that ensure automated real-time compliance. In comparison with the traditional state control model, which is

based on extensive inspection practices, fragmented licensing, and delayed response, the «Trek.Food Government» system demonstrates the properties of a self-regulating ecosystem, in which each module serves as both a data source and a full unit of accountability, with legally significant digital identity and reputational trace. At the same time, the full-scale implementation of this model requires addressing a range of systemic challenges:

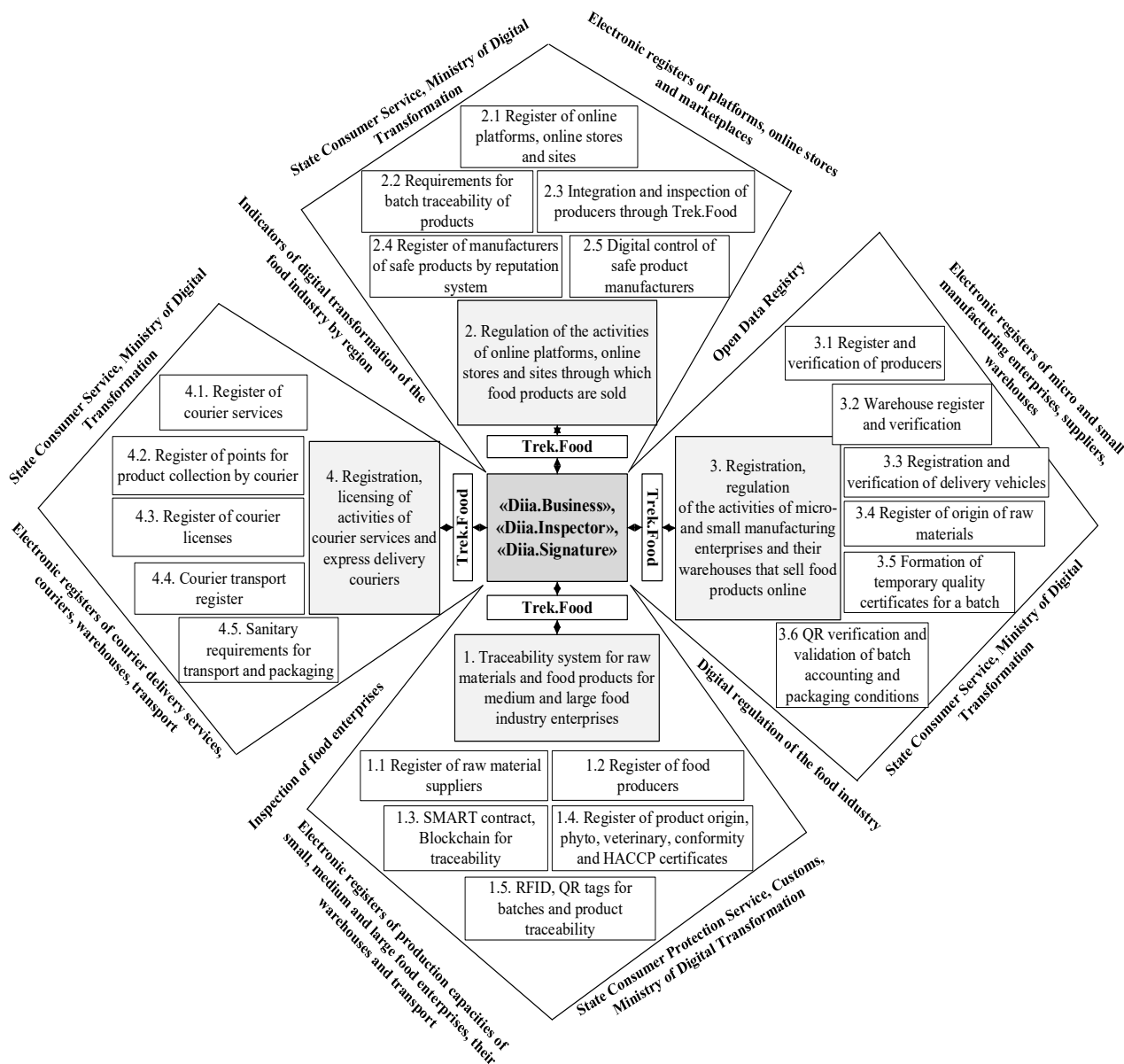


Fig. 2. Concept of digital transformation of the state food product traceability system in the context of electronic and fast commerce

Source: developed by the author

- First, the legal codification of the legal status of digital artifacts such as smart contracts, digital certificates, and blockchain registers is necessary, as without regulatory recognition, their authority will remain declarative.
 - Second, it is critically important to ensure interoperability between state and private information systems through the standardization of APIs, exchange formats, and identification protocols, particularly regarding integration with international certification platforms.
 - Third, a national IoT monitoring infrastructure should be deployed in warehouses, transport hubs, and mobile logistics, which requires technical investments and the development of a new level of digital competence within the regions.
- Ultimately, the key issue will remain the establishment of digital accountability through the creation of an algorithmic model for determining liability in cases of inaccurate, missing, or falsified data.

As the next step, we will develop general procedural schemes for implementing digital registration and verification of «Safe Food Enterprises» (Fig. 3), «Safe Warehousing Facilities» (Fig. 4), «Safe Transport Vehicles» (Fig. 5), and a general procedural scheme for implementing digital control of sales, delivery, and incident response (Fig. 6) in the context of electronic and rapid commerce.

According to Fig. 3, the entry channel for the presented procedure of digital registration and verification of «Safe Food Enterprises» consists of three categories of participants: food producers; micro and small producers engaged in the production and online sale of food products; and courier services (only in terms of legal registration) that ensure the rapid delivery of food products.

Thus, the system accounts for the specifics of actors operating within the hybrid conditions of the physical and digital economy, forming an individualized digital registration trajectory according to the participant type. The key entry point into the regulatory environment is the business registration on the state platform «Diia.Business» using standardized forms. At this stage, algorithmic structuring of the initial data is carried out, ensuring its automated transfer for verification in «Diia.Inspector», and subsequently to the State Consumer Service. Thus, the verification of authenticity and legality occurs without direct interaction with an inspector, indicating a shift away from the traditional permit model toward digital legitimization through verified state channels. After confirming the legal status of the entity, its data is automatically entered into the «Legal Registry of Enterprises» (if it had not been previously added), representing a legally significant outcome of the first phase of identification.

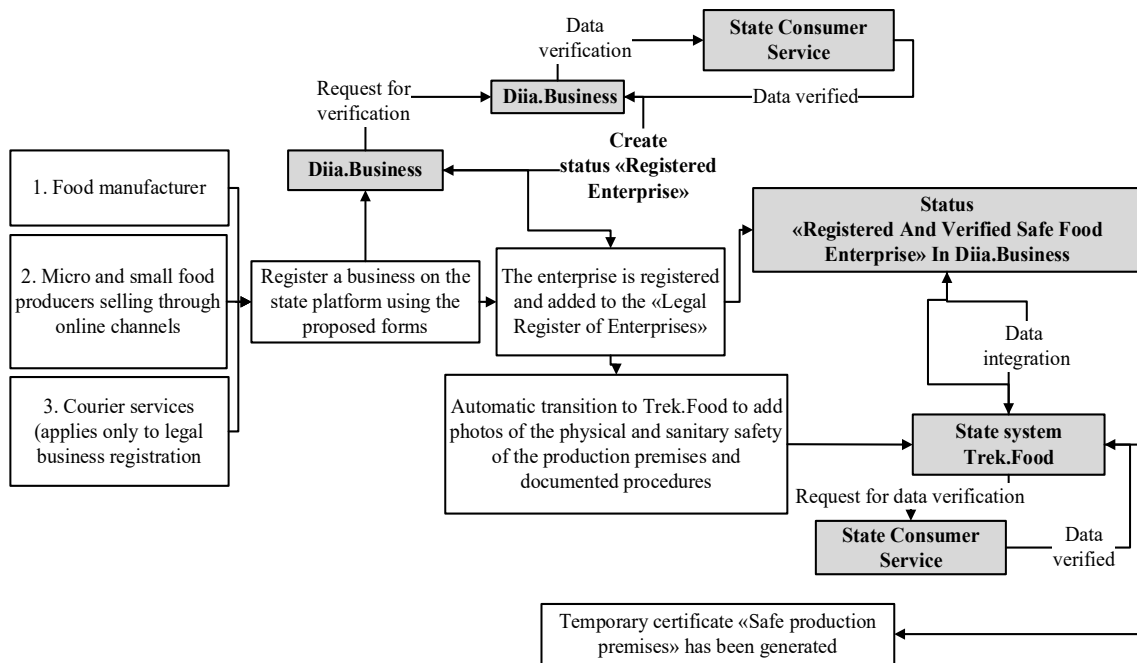


Fig. 3. General procedural scheme for the implementation of digital registration and verification of «Safe Food Enterprises» in the context of electronic and fast commerce

Source: developed by the author

Importantly, the system provides for an immediate transition to the «Trek.Food» digital platform, where the enterprise uploads visual evidence (photos) of the sanitary condition of its premises and procedural documents. This approach confirms the transition from declaration to digital visualization as a new method of compliance verification, significantly increasing transparency and reducing corruption risks. Based on the submitted information, a temporary «Safe Production Facility» certificate is issued, which does not yet guarantee full verification. Its validity is checked upon request from «Trek.Food» to the State Consumer Service, which performs the final data verification. Upon confirmation, the results are integrated into the national system, and the entity receives the status of «Registered and Verified Safe Food Enterprise» within the «Diia.Business» system, establishing both legal status and a marker of digital integrity and compliance within the food supply chain traceability system. An innovative feature of this model is the automatic transition between institutions without the entrepreneur’s participation, reducing the regulatory burden on businesses and creating the prerequisites for a new type of service-oriented state. Additionally, the logic of the system’s design indicates a bilateral data verification process: from the enterprise (submitted documents and photos) and from the state (cross-checking with the State Consumer Service databases), ensuring systemic reliability of the outcome.

Next, we will examine the general procedural scheme for implementing digital registration and verification of «Safe Warehousing Facilities» in the context of electronic and rapid commerce (see Fig. 4).

Following the example shown in Fig. 3, the subsequent general procedural scheme for implementing digital registration and verification of «Safe Warehousing Facilities» in the context of electronic and rapid commerce (Fig. 4) is carried out.

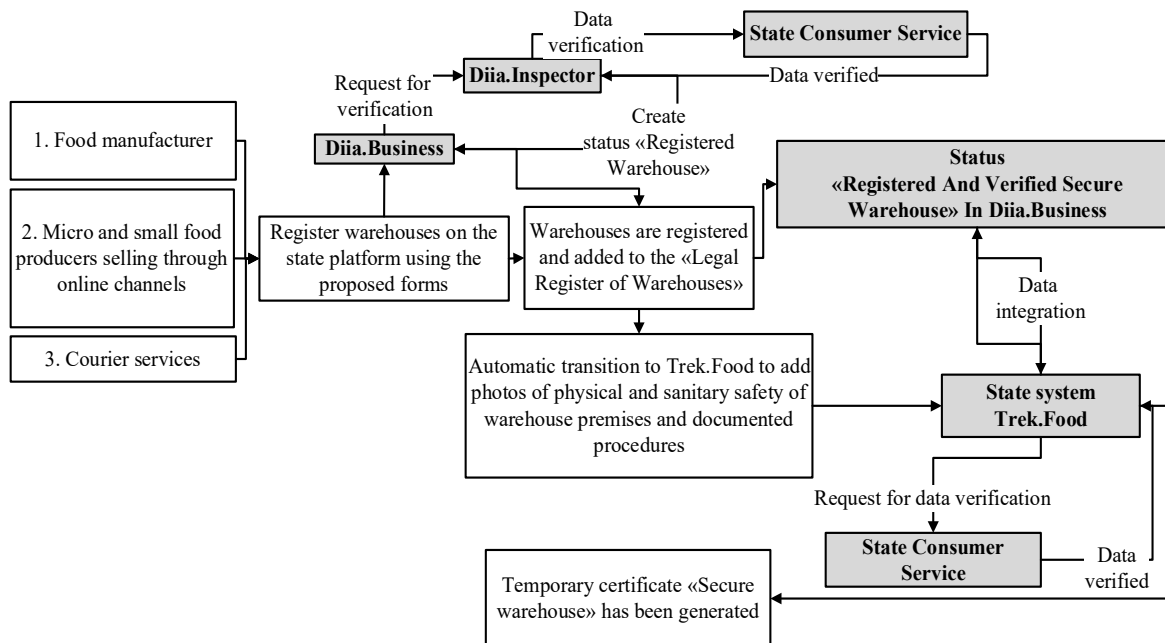


Fig. 4. General procedural scheme for the implementation of digital registration and verification of «Safe Warehouse Facilities» in the context of electronic and fast commerce

Source: developed by the author

However, for verification photo-control, the following parameters are analyzed: the location for storing raw materials, the location for storing finished products, the presence of temperature, humidity, and airtightness control systems, documented batch accounting to ensure traceability, and data from logistics enterprises involved in transportation.

Following the example shown in Fig. 3, the subsequent general procedural scheme for implementing digital registration and verification of a «Safe Transport Vehicle» in the context of electronic and rapid commerce (Fig. 5) is carried out. However, for verification photo-control, the following parameters are subject to analysis: the external condition of the vehicle and its internal compartments, the type of transport vehicle, sanitary condition, compliance with food transportation requirements, the presence of temperature, humidity, and airtightness sensors, the presence of GPS traceability systems, or a contract with the transport owner company (if it is an external carrier).

In the absence of a verified business entity status, this indicates that the enterprise has either unconfirmed safety data or existing violations, which primarily allows for a preliminary conclusion not to engage with this enterprise.

An additional element that will provide more detailed evidence of safety violations in the production, storage, or transportation of products will be the «enterprise rating system», which will be formed according to the number of product-related incidents recorded via the QR-code feedback mechanism (Fig. 6).

Let us consider the general procedural scheme for implementing digital control of sales, delivery, and incident response in the context of electronic and rapid commerce (see Fig. 6).

According to Fig. 6, the presented general procedure demonstrates the algorithmic transition from the registration function to the function of adaptive regulatory oversight, in which the state not only records the status of enterprises but also responds to behavioral anomalies detected directly within the delivery chain. The central element of the scheme is the digital trace of each product package, recorded through the assignment of a QR-code within the «Trek.Food» system. Each order is recorded as a digital transaction linked to a specific batch, package, transport, and supplier.

Thus, the starting point becomes the customer’s order placed via an online platform or mobile application, to which the manufacturer assigns a batch-specific unique identifier and applies final product labeling, ensuring traceability and enabling tracking of the entire product supply lifecycle from the place of production to the moment the customer opens the packaging. After the product is dispatched using verified transportation compliant with sanitary requirements, the key moment occurs when the end consumer receives the order and, using a QR-code, verifies the product’s authenticity,

quality, and compliance. If no incidents are identified upon receipt of the order, the transaction is completed successfully, which automatically forms a positive reputational trace of the enterprise within the «Trek.Food» system.

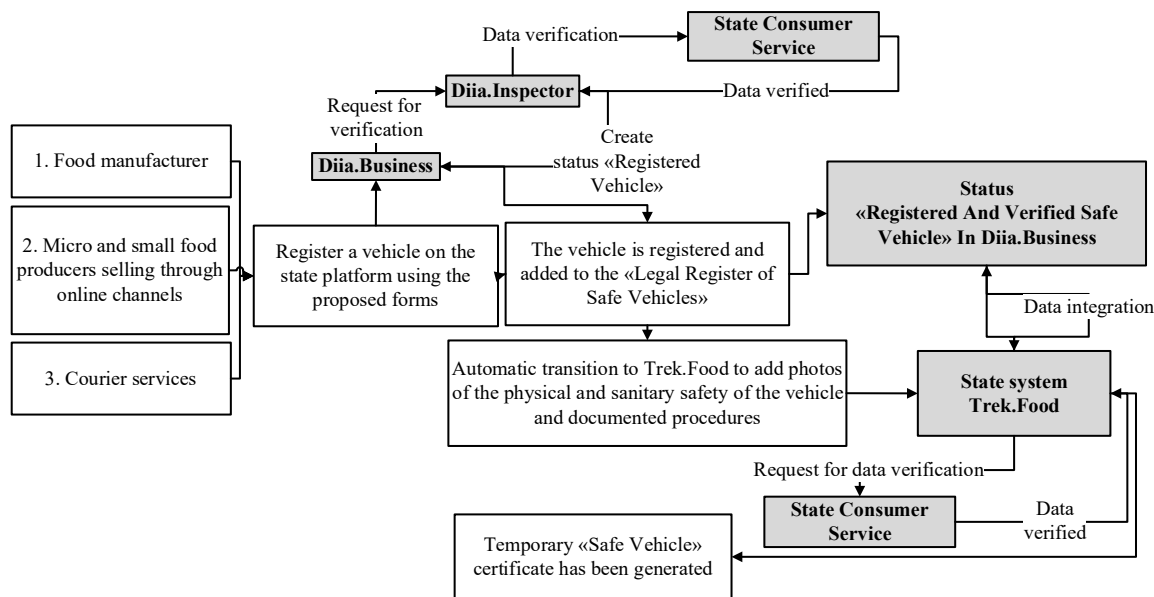


Fig. 5. General procedural scheme for the implementation of digital registration and verification of a «Safe Vehicle» in the context of electronic and fast commerce

Source: developed by the author

However, in a negative scenario where the customer identifies an incident (such as unsafe packaging, damage, or signs of counterfeiting), they scan the «QR-code», activating the incident response procedure within the «Trek.Food» framework. The system logs the event, identifies the enterprise, batch, delivery route, and other delivery parameters, and then transmits a digital report to the State Consumer Service. This mechanism serves as an example of a consumer-triggered regulatory approach where the initiative comes not from an inspector but from the customer, significantly increasing the speed and objectivity of the response.

The system then transitions to adaptive scenario-based regulation, where it is confirmed that the incident is related to minor factors that can be improved through corrective actions.

However, if the incident concerns a hazardous factor (health/safety), a comprehensive audit of production, warehouses, transportation, and packaging is conducted, ensuring proportional state intervention by involving inspections according to the risk level of the incident rather than a formal schedule. In cases of systematic violations, the «Trek.Food» system records the accumulation of negative reputational assessments, after which the system automatically restricts the enterprise’s functionality and changes its status in «Diia.Business» to «unverified enterprise», or initiates a license revocation procedure. This process transforms reputation into an active regulatory instrument, where digital reputational weight carries not only an image-related but also a legal force, fundamentally shifting the regulatory model from formal to behavioral oversight.

A distinctive feature of this model is that each incident is considered in the context of batch-specific labeling, a specific transaction, rather than the general profile of the enterprise, ensuring high precision in state response, avoiding collective liability, and allowing the rapid isolation of problematic segments without halting the entire business operation.

Conclusions

Within the scope of the research, a conceptual model of state digital traceability in the food industry was developed as a response to the transformation of the food sector under conditions of electronic and rapid commerce. The designed architecture of the «Trek.Food Government» system is based on the principles of data-driven governance, algorithmic verification, and integration with public digital platforms («Diia.Business», «Diia.Inspector», «Diia.Signature»), ensuring end-to-end interaction between state registries, business structures, and logistics operators. The proposed four functional blocks (registration, authorization, digital accounting, digital control) will enable end-to-end traceability, automated safety verification, and real-time incident response. Functionally, this model envisions the application of digital identity, the participant’s reputational profile, an incident response mechanism, and behavioral control, allowing a transition from inspection-based logic to preventive, risk-oriented regulation using SMART-contract tools, QR technologies, Blockchain identification and digital verification procedures.

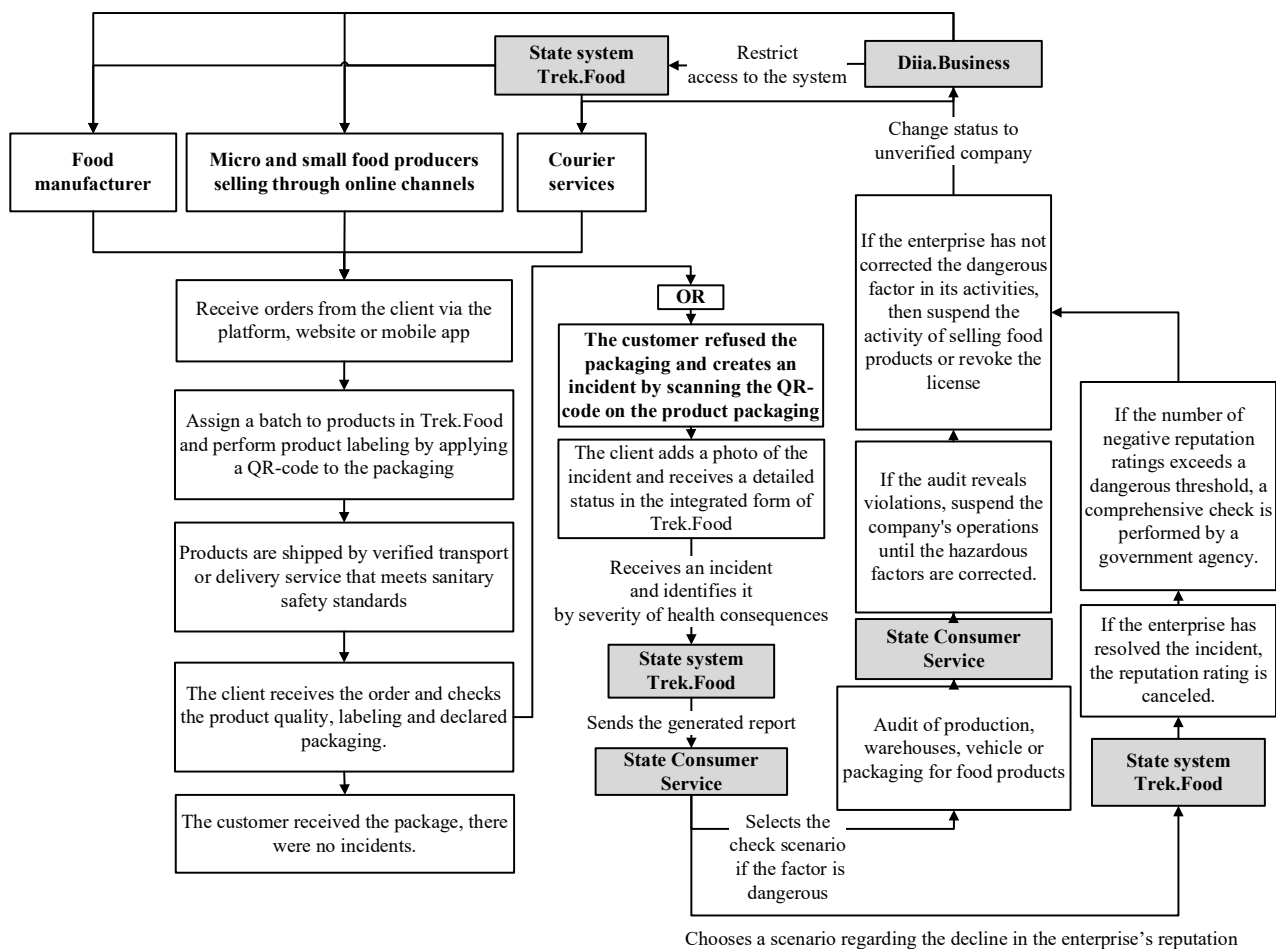


Fig. 6. General procedural scheme for the implementation of digital control of sales, delivery and incident response in the context of electronic and fast commerce

Source: developed by the author

References

1. Ellahi R.M., Wood L.C., Bekhit A.E. (2024). Blockchain-Driven Food Supply Chains: A Systematic Review for Unexplored Opportunities. *Applied Sciences*. Vol. 14 (19). DOI: <https://doi.org/10.3390/app14198944>
2. Reddy P., Kurnia S., Tortorella G.L. (2022). Digital Food Supply Chain Traceability Framework. *Proceedings*. Vol. 82 (1). DOI: <https://doi.org/10.3390/proceedings202208200>
3. Charlebois S., Latif N., Ilahi I., Sarker B., Music J., Vezeau J. (2024). Digital Traceability in Agri-Food Supply Chains: A Comparative Analysis of OECD Member Countries. *Foods*. Vol. 13 (7). DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13071075>
4. Lukacs M., Toth F., Horvath R., Solymos G., Alpár B., Varga P., Kertesz I., Gillay Z., Baranyai L., Felfoldi J., et al. (2025). Advanced Digital Solutions for Food Traceability: Enhancing Origin, Quality, and Safety Through NIRS, RFID, Blockchain and IoT. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. Vol. 14 (1). DOI: <https://doi.org/10.3390/jsan14010021>
5. Verna E., Genta G., Galetto M. (2025). Enhanced Food Quality by Digital Traceability in Food Processing Industry. *Food Engineering Reviews*. Vol. 17, pp. 359–383. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-024-09392-4>
6. Corallo A., Paiano R., Guido A.L., et al. (2018). Intelligent Monitoring Internet of Things Based System for Agri-Food Value Chain Traceability and Transparency: A Framework Proposed. *IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS)*. pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/EESMS.2018.8405814>
7. Mishra N., Mistry S., Choudhary S., et al. (2020). Food Traceability System Using Blockchain and QR Code. *IC-BCT 2019. Springer Nature Link Singapore*. pp. 33–43. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4542-9_4
8. Official page GS1. What is a QR Code? Available at: <https://www.gs1us.org/upcs-barcodes-prefixes/what-is-a-qr-code>
9. Official page GS1. What Is RFID Technology, and How Does It Work? Available at: <https://www.supplychain.gs1us.org/rfid>

10. Official page IBM. What are smart contracts on blockchain? Available at: <https://www.ibm.com/think/topics/smart-contracts>
11. Official page IBM. What is the Internet of Things (IoT)? Available at: <https://www.ibm.com/think/topics/internet-of-things>
12. Official page IBM. What is big data analytics? Available at: <https://www.ibm.com/think/topics/big-data-analytics>

Дата першого надходження рукопису до видання: 20.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

М. М. ПАЛАНИЦЯ

аспірант кафедри державного управління і місцевого самоврядування
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0006-9988-7722

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО СПІВПРАЦІ ВЛАДИ ТА БІЗНЕСУ У ФОРМУВАННІ СТРАТЕГІЙ СТАЛОГО МІСЦЕВОГО РОЗВИТКУ

У даній роботі розглянуті інноваційні підходи до співпраці влади та бізнесу у формуванні стратегій сталого місцевого розвитку, що впливають безпосередньо на модернізацію регіонального управління та сприяють ефективному розвитку та швидкому відновленню місцевої економіки після військових руйнувань. Досліджено теоретичні аспекти та практичну сторону формування ефективних моделей публічно-приватного партнерства, які напряму залежать від новітніх інноваційних механізмів та існуючих цифрових платформ і технологій, також проаналізовано зростання рівня довіри бізнесу до влади із врахуванням специфіки українських громад. Визначені основні принципи краудсорсингу та crowd-технологій в контексті злагодженої співпраці між бізнесом і владою при формуванні стратегій місцевого розвитку, із акцентуванням уваги, що саме підприємництво виступає основним каталізатором змін в громаді і є активним учасником територіальних трансформацій.

У статті висвітлені інноваційні підходи до співпраці влади та бізнесу у формуванні стратегій сталого місцевого розвитку. Головні завдання полягають у виявленні несприятливих для бізнесу перешкод і інших бар'єрів, в тому числі недосконалість нормативно-правових актів, недовіру до влади, військові чинники із подальшим перезапуском існуючого публічно-приватного партнерства при відбудові країни. Наголошено на важливій ролі інноваційної політики та розвитку прогресивних трудових ресурсів як головних чинників забезпечення функціонування місцевої економіки із подальшими можливостями виходу бізнесу на світовий ринок новітніх технологій та інновацій. Проведене дослідження дозволило систематизувати наявні інноваційні підходи до співпраці влади та бізнесу у формуванні стратегій сталого місцевого розвитку та в подальшому адаптувати їх з метою економічного зростання любого регіону нашої держави.

З метою імплементації інноваційних підходів до співпраці влади та бізнесу у формування стратегій сталого місцевого розвитку, необхідно розробити дієві інноваційні механізми та підходи до співпраці влади та бізнесу при формування стратегій сталого місцевого розвитку спираючись на вже існуючий досвід провідних вчених, економістів і державних діячів.

Ключові слова: влада, бізнес, публічне управління, взаємодія влади і бізнесу, інноваційні підходи, публічно-приватне партнерство.

M. M. PALANYTSIA

Postgraduate Student at the Department of State Administration
and Local Self-Government
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0006-9988-7722

INNOVATIVE APPROACHES TO COOPERATION BETWEEN AUTHORITIES AND BUSINESS IN FORMING SUSTAINABLE LOCAL DEVELOPMENT STRATEGIES

This paper examines innovative approaches to cooperation between government and business in the formation of sustainable local development strategies, which directly affect the modernization of regional governance and contribute to the effective development and rapid recovery of the local economy after military destruction. The theoretical aspects and practical side of the formation of effective models of public-private partnership, which directly depend on the latest innovative mechanisms and existing digital platforms and technologies, are studied, and the growth of the level of business trust in government is also analyzed, taking into account the specifics of Ukrainian communities. The main principles of crowdsourcing and crowd-technologies are determined in the context of coordinated cooperation between business and government in the formation of local development strategies, with an emphasis on the fact that entrepreneurship is the main catalyst for change in the community and is an active participant in territorial transformations.

The article highlights innovative approaches to cooperation between government and business in the formation of sustainable local development strategies. The main tasks are to identify obstacles and other barriers unfavorable for business, including the imperfection of regulatory legal acts, distrust of government, military factors with the subsequent

restart of the existing public-private partnership in the reconstruction of the country. The important role of innovation policy and the development of progressive labor resources as the main factors in ensuring the functioning of the local economy with further opportunities for business to enter the global market of new technologies and innovations is emphasized. The research made it possible to systematize existing innovative approaches to cooperation between government and business in the formation of sustainable local development strategies and to further adapt them for the purpose of economic growth of any region of our country.

In order to implement innovative approaches to cooperation between government and business in the formation of sustainable local development strategies, it is necessary to develop effective innovative mechanisms and approaches to cooperation between government and business in the formation of sustainable local development strategies, based on the existing experience of leading scientists, economists, and statesmen.

Key words: *government, business, public administration, interaction between government and business, innovative approaches, public-private partnership.*

Постановка проблеми

В сучасних умовах цифрової трансформації, суперечливого процесу глобалізації економіки, активних військових дій, ключовим завданням розвитку місцевої економіки є формування ефективної співпраці між бізнесом та владою. Нажаль, традиційні механізми співпраці часто є недостатніми з метою забезпечення подальшого сталого економічного розвитку територіальних громад, оскільки не враховуються всі потреби у швидкій адаптації до економічних, екологічних і інноваційних викликів. Бізнес-структури являються важливим драйвером економічного розвитку, але для реалізації всього підприємницького потенціалу потрібно активно залучати бізнес до стратегічного планування місцевого розвитку. З другої сторони – територіальні громади після проведеного процесу децентралізації отримали широкі управлінські повноваження і потребують сучасних інноваційних інструментів, щоб залучити місцевий бізнес до вирішення наболілих соціально-економічних проблем. Саме тому виникає науково-практична проблема пошуку та впровадження нових ефективних моделей взаємодії влади і бізнесу з метою створення синергії інтересів абсолютно всіх учасників процесу [1].

Питання інноваційних підходів до співпраці влади та бізнесу у формуванні стратегій сталого місцевого розвитку розглядається саме на місцевому рівні, тому важливим завданням є розробка дієвої методики інноваційних підходів до партнерства владних структур і бізнес-еліт. Окрім цього, сучасна модель співпраці влади та бізнесу свідчить про недосконалість існуючих інноваційних підходів, які сприяють кращій взаємодії представників бізнесу та громади. В умовах високої конкуренції між територіальними громадами за інвестиції та капітальні вкладення, місцеві органи влади дедалі більше залежать від бізнесу саме в інноваційному плані і розглядають бізнес не як джерело отримання доходів, але й головного партнера у формуванні стратегій місцевого розвитку із залученням сучасних методів цифровізації. Досить часто брак нормальних комунікацій між владою і бізнесом приводять до нівелювання розробки стратегії місцевого розвитку, спільні зусилля фрагментуються, а результат не виправдовує очікування. Це обумовлює актуальність наукового пошуку дієвих інноваційних підходів до співпраці влади та бізнесу у формуванні стратегій сталого місцевого розвитку, враховуючи цифрові технології, дієві інноваційні практики і моделі приватно-публічного партнерства [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематику вивчення інноваційних підходів до співпраці влади та бізнесу у формуванні стратегій сталого місцевого розвитку через призму публічно-приватного партнерства, моделі функціонування територіальних громад, формування стратегій місцевого розвитку досліджували такі науковці, як А. Бессонова, Н. Бахур, Г. Бутерко, В. Проць, Л. Пронько, Я. Чорний, Ю. Літвінов, В. Якубів, В. Шаповал та інші [1]. Однак вплив інноваційних підходів до співпраці влади та бізнесу у формуванні стратегій сталого місцевого розвитку – новий і мало вивчений напрям для проведення подальшого аналізу ефективного партнерства владних і бізнес-структур.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є дослідження інноваційних підходів до співпраці влади та бізнесу при формуванні стратегій сталого місцевого розвитку та подальша синергія між владними і бізнесовими структурами, з ціллю зниження негативних наслідків в економіці регіонів, особливо в важкі періоди для нашої держави та подальшої повоєнної відбудови країни.

Викладення основного матеріалу дослідження

В процесі розвитку місцевої економіки особлива увага повинна приділятися інноваційним інструментам співпраці бізнесу та влади з метою кращих комунікацій, підвищення ефективності рішень, залучення широкого кола зацікавлених осіб до процесу стратегічного планування розвитку громади. Одним із таких інструментів є цифрові платформи, які виступають каналами двосторонньої комунікації між владою та бізнесом, за допомогою яких відбувається доступ до відкритої інформації, проходять електронні консультації, обговорюються стратегічні програми і подальший моніторинг їх реалізації [1].

В Україні активно впроваджуються в життя система «Smart City» та інтегровані портали надання електронних послуг, все це приваблює бізнес до прийняття спільних рішень із владою на місцевому рівні. Також важливою

інноваційною складовою успішної співпраці бізнесу та влади є краудфандинг і краудсорсинг. За допомогою краудфандингу відбувається акумуляція коштів на реалізацію локальних проєктів шляхом залучення активних громадян громади і представників місцевого бізнесу, а краудсорсинг залучає інтелектуальний потенціал громади до розробки важливих рішень і стратегій місцевого розвитку [1].

Інноваційність вищезазначених інструментів полягає не лише у використанні сучасних цифрових технологій, але й у форматі зміни самої парадигми взаємодії, а саме відхід від стандартних адміністративних відносин до багаторівневого партнерства, де влада, бізнес і жителі громади є рівноправними партнерами. Саме інноваційні інструменти взаємодії бізнесу та влади є надійним фундаментом формування стратегій сталого місцевого розвитку. Ефективне застосування подібних інструментів дасть змогу накопичити необхідні ресурси, посилити загальну згуртованість зацікавлених сторін і сформувати конкурентоспроможні території з орієнтацією на сталий соціально-економічний розвиток і прогрес [1].

Інноваційні системи на різних рівнях, до прикладу, національні, регіональні та місцеві тісно пов'язані між собою. Так, національний рівень закладає певні нормативні норми для функціонування інноваційних процесів на регіональному рівні, а регіональні та місцеві рівні формуються за рахунок територіальних ідентифікаторів, а саме традицій, звичок, спільної історії, норм поведінки та іншого, забезпечуючи при цьому функціонування індивідуальних інноваційних процесів, що зрештою відображаються на національному рівні. Можна зробити проміжний висновок, що регіональний рівень розвитку інноваційної системи залежить від наступних чинників:

- вірно визначених інноваційних стратегічних цілей розвитку певного регіону;
 - правильно розставлених пріоритетів інноваційної діяльності;
 - фінансового, економічного, науково-освітнього та правового забезпечення інноваційної діяльності;
- дієвих регуляторних механізмів інноваційного розвитку [2,120].

З метою забезпечення інноваційного розвитку регіонів на засадах сталого розвитку велике значення відводиться саме формуванню зрілого науково-освітнього середовища. Тобто, викладачі, вчителі та вітчизняні науковці повинні впроваджувати певні цілі, цікаві ідеї, завдання та принципам сталого місцевого розвитку, застосовувати при цьому сучасні інноваційні технології. Слід відмітити, що сутність інноваційного механізму сталого розвитку полягає у багатофункціональності, а саме даний механізм функціонує згідно певних принципів і цілей сталого розвитку на підставі використання фінансово-економічного, інституційно-правового та освітньо-наукового забезпечення [2,131]. Враховуючи пріоритетність інноваційного напрямку формування узагальненої моделі регіонального розвитку, система економічних механізмів впливу повинна містити напрям, який відповідає за інвестиції в інноваційну діяльність, таким чином, мова йде про пошук і підтримка інвесторів, стимулювання інноваційної активності, підтримки розвитку інноваційної інфраструктури, фінансування, аналіз зниження інвестиційних ризиків, зниження окремих адміністративних бар'єрів. Саме за таких умов, влада має виконувати стабілізуючі функції, притримуючись норм законодавчої та судової системи [2,186].

Розглянемо одночасно і комплексне і складне значення слова «розумне місто». Зауважимо, що велика частина визначень зводиться саме до такого як: розумна економіка (це підприємництво, економічний імідж, інновації), розумне управління (прозорість, надання якісних послуг, участь в прийнятті різноманітних рішень), розумне середовище (мова про управління ресурсами та захист навколишнього середовища), розумні громадяни (система навчання, гнучкість, професійна кваліфікація), розумна мобільність (мережа транспортної інфраструктури) і розумне життя (мережа закладів освіти, культури та охорони здоров'я) [3].

Приймаючи до уваги просторові особливості й унікальність різних міст в окремих регіонах планети, відмітимо, що управління їхнім інноваційним розвитком на основі цифрових технологій базується на різних методах і механізмах із врахуванням місцевих умов, соціальних особливостей та розвитку технологічного прогресу. До прикладу, модель розумного міста Барселони являє собою інтеграцію технологічних рішень, принципів сталого розвитку міста та управління міста окремими представниками громади із можливістю впливати на рішення влади. А ось Сінгапурська модель «Smart Nation» ґрунтується на централізованому підході управління міськими інноваціями, приділяючи велику увагу питанням безпеки та ефективності [3].

Моделі інноваційного розвитку міст представлені в різних варіаціях, тому крім «розумного міста» виділяють «розумний регіон», «інноваційне місто», «територія інновацій», «відкрите місто». Зазвичай одне і те саме місто може бути одночасно розумним, інноваційним, відкритим. Управління інноваційним розвитком «розумних міст» може розглядатися як єдина система якісної трансформації міських територій. Приймаючи до уваги регіональні та місцеві особливості функціонування міст, застосування методів підтримки інновацій може суттєво різнитися для окремих територій [3].

Управління має бути ефективним насамперед на місцевому рівні, тому що органи місцевого самоврядування покликані надавати якісні та прозорі послуги громадянам і представникам місцевого бізнесу. В умовах постійного проведення критично важливих для місцевої економіки реформ, вкрай виправданим є неабияка гнучкість та креативність в прийнятті управлінських рішень, розробка та впровадження проєктів і програм розвитку із використанням передових інноваційних технологій. Для ефективного практики публічного управління застосування

інноваційних інструментів управління, які випереджають розвиток технологій, соціальних мереж, інформаційних ресурсів за допомогою яких приймаються оперативні рішення є нагальною та важливою проблемою [4].

Хаб «Місто змістів» – це певна соціальна інновація та драйвер соціальної активності, осередковий майданчик в м. Вінниця де представники місцевого бізнесу, різних міських об'єднань і громадських організацій, місцева влада дискутують про подальший розвиток міста, обмінюються практичним досвідом, приймають участь в процесах прийняття рішень, генерують цікаві ідеї, діляться інноваціями та проектами і отримують підтримку в подальших їх реалізаціях. Головна ідея подібного хабу – це міжсекторальний діалог між місцевою владою, бізнесом та активною громадськістю. Ізюминка хабу в тому, що в неформальній обстановці зацікавлені учасники спілкуються, працюють та розбудовують Вінницю. Вінницький хаб «Місто змістів» зблизив владу і бізнес, а їх ефективна співпраця направлена на вирішення соціально-економічних проблем [4].

За даними Департаменту інвестицій, інновацій та інтелектуальної власності Мінекономіки України, станом на 24 січня 2024 року на умовах публічно-приватного партнерства було укладено 198 договорів, але з яких нажалі реалізується лише 22 договори, де до найбільш успішних проектів відносять концесію портів Херсон і Ольвія. Як бачимо основна проблема не в укладенні договорів, а саме в їх реалізації, саме тому і представникам бізнесу і представникам влади слід розглядати державно-приватне партнерство як важливий інструмент для розвитку важливих інфраструктурних проектів або надання адміністративних послуг. Однією із проблем такої недовіри є низька обізнаність і компетентність на місцевому рівні бізнесменів і посадових осіб владних структур [5].

Інноваційний розвиток громади – це перехід на новий рівень економічного управління з метою досягнення економічних, соціальних і екологічних результатів, встановлення високих темпів покращення рівня життя та добробуту всіх членів громади, в тому числі і бізнесу. Тріада взаємодії: влада-бізнес-громада сприяє інноваційному розвитку, відкритості влади, захисту виробників і споживачів та зміцнює підприємницький дух бізнесменів. Інноваційний прогрес окремо взятої території залежить від впливу різних чинників, серед яких географічний та демографічний потенціал, достатня кількість інтелектуальних трудових і ресурсів та тенденцій розвитку інституцій держави та підприємств [6].

Хмарні технології, методи збору та аналізу великого об'єму даних, краудсорсинг, безпілотні автомобілі, крипотовалю та інші сучасні інноваційні технології значно впливають на розвиток різних галузей економіки. З метою сталого розвитку громад, регіональна політика повинні включати певні заходи, які спрямовані на пошук засобів для створення новітньої фінансової моделі з метою вкладення в сучасні інноваційні проекти, що згодом приводить до економічного ефекту та покращення конкурентоспроможності громад [6].

Економічні стимули, колоборація раціональної політики та вірних дій місцевої влади ефективно впливають на формування стратегій сталого розвитку. Вирішення проблем сталого розвитку регіонів під час глобалізації напряму пов'язане з якісною переорієнтацією певного регіону, де в основі лежить прагнення громади до підвищення власної конкурентоспроможності із використанням стратегій інноваційного прориву. Проведення вдалої інноваційної політики сприятиме покращенню національної безпеки, досягнення економічної стабільності, докорінному технічному переозброєнню промисловості, раціональному використанні природних ресурсів, вирішення різноманітних соціальних потреб населення, забезпечення потреб учасників процесу в сировині, енергії та матеріалах. Точкове стимулювання та регулювання інноваційної діяльності критично важливих підприємства та інших технічно розвинених товаровиробників має стати головним пріоритетом забезпечення національних інтересів [7].

В 2024 році за фінансової підтримки Європейського Союзу, урядів Швеції та Данії на базі 10-ти територіальних громад України були відкриті *Офіси відновлення та розвитку*, де для жителів громад проводяться тренінги, консультації та вебінари по відновленню та започаткуванню бізнесу, вирішуються проблеми релокації бізнесу, а для влади – вивчається процес розробки і координації проектів і планів розвитку, проговорюється створення інноваційного банку ідей розвитку, обговорюються комунікації влади і бізнесу за допомогою цифрових ресурсів (сайтів, соціальних мереж і іншого), проводяться неформальні заходи (виставки, аукціони, майстер-класи), організуються навчальні заходи для бюджетних установ із метою підвищення кваліфікації, яка буде використана в подальшій повоєнній відбудові України [8].

З метою ефективного регіонального розвитку слід звернутися до досвіду європейських країн відносно створення і функціонування *Агенцій регіонального розвитку*. Головним завданням агенцій є залучення інвестицій, реалізація проектів міжрегіонального значення, надання консультацій та практичної підтримки місцевій владі та бізнесу. В Україні процес запуску подібних агенцій відбувся відносно недавно, але і вони стикаються із цілим рядом викликів, серед яких обмеження кадрових і фінансових ресурсів, малий рівень інституційної спроможності, недосконале правове регулювання. З метою підвищення ефективності функціонування агенцій регіонального розвитку є процес налагодження співпраці між бізнесом і владою шляхом формування спільних платформ для обміну інформацією та практичним досвідом. Перспективним напрямом стало б також і створення кластерних об'єднань у інноваційній, культурній, економічній, туристичній та інших сферах [9].

Прикладом успішного функціонування кластерних об'єднань є ІТ-кластера, які поєднують в собі: ІТ-компанії, місцеву владу, університети та наукові установи. Не слід забувати і про такий ключовий напрям впровадження інноваційних управлінських рішень, як розвиток електронного урядування. Електронне урядування спрощує процес отримання адміністративних послуг для бізнесу і громадян, піднімає довіру до влади, знижує корупційну складову під час отримання дозволів для ведення бізнесу та залучає громадян до процесу ухвалення управлінських рішень. Застосування підходів проєктного менеджменту в діяльності органів влади дозволяє досягти запланованих результатів в чітко визначені терміни, покращити координацію, комунікацію та ефективно використати обмежені ресурси [9].

Висновки

Для практичної реалізації та адаптації втілення інноваційних інструментів потрібна єдина узгоджена позиція бізнесу, влади та активних представників громади. Саме напрацювання комплексного рішення і побудова комплексної системи взаємодії створить сприятливі умови для відбудови економіки на засадах прозорості, соціальної відповідальності та інноваційності, особливо у післявоєнний період. Із метою зменшення впливу бар'єрів, які стоять на шляху розбудови інноваційних підходів до співпраці влади і бізнесу потрібно провести цілий ряд заходів, серед яких удосконалення вітчизняного законодавства, активізація владних структур по налагодженню партнерських відносин із приватним бізнесом, зміни усталеної парадигми державно-приватного партнерства, пошук нових моделей синергії влади і бізнесу. Синергетичний ефект від зміни інноваційних підходів до взаємодії влади і бізнесу повинен виражатися в створенні сучасних кластерних об'єднань, промислово-інноваційних парків, бізнес-інкубаторів, фондів із підтримки бізнесу, розвитку системи комунікацій влади і бізнесу.

Список використаної літератури

1. Бессонова А. В., Безугла Л.С., Агафонов О.Д. (2025). Інноваційні інструменти взаємодії бізнесу та територіальних громад для розвитку місцевої економіки. *Економіка та суспільство*. Вип. № 79. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-79-11>
2. Карпенко Г. Ю. (2022). Формування інноваційної моделі сталого розвитку регіонів в умовах глобальної турбулентності: дис. канд. екон. наук: Одес. держ. екол. ун-т, Одес. нац. технол. ун-т. 230 с. Режим доступу: <https://ontu.edu.ua/download/dissertation/disser/2022/Disser-Karpenko.pdf>
3. Крисоватий І. А. (2024). Організаційно-просторові особливості управління інноваційним розвитком розумних міст. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*. № 4. С. 133–143. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/efmapnp_2024_4_11
4. Приходченко Л. Л. (2023). Концепція «краудсорсингу» та crowd-технології як засади підвищення ефективності функціонування місцевого самоврядування. *Актуальні проблеми державного управління*. № 2 (63). С. 56–68. DOI: <https://doi.org/10.26565/1684-8489-2023-2-04>
5. Носков О. М. (2024). Публічно-приватне партнерство органів місцевого самоврядування та малого і середнього бізнесу: інноваційні підходи в українських громадах. *Проблеми сучасних трансформацій. Серія: право, публічне управління та адміністрування*. № 14. DOI: <https://doi.org/10.54929/2786-5746-2024-14-02-05>
6. Томашук І. В. (2023). Стратегічні основи інноваційного розвитку територіальних громад. *Економіка та суспільство*. Випуск 57. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-57-81>
7. Шевчук О. Р. (2025). Державне управління сталим розвитком територій у процесі глобалізації. *Успіхи й досягнення в науці*. № 9. С. 940–949. DOI: [https://doi.org/10.52058/3041-1254-2025-9\(19\)-940-949](https://doi.org/10.52058/3041-1254-2025-9(19)-940-949)
8. Овчаренко Т., Дегтярьова І., Малько Ю. (2024). Інтегрований підхід до відновлення та розвитку громади: метод. рек. для органів місцевого самоврядування. *Програма розвитку ООН (ПРООН) в Україні та фінанс. підтримки Уряду Швеції*. 64 с. Режим доступу: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2024-12/metodyka_samoosinky.pdf
9. Хольченко М. О. (2025). Удосконалення інституційного забезпечення регіонального розвитку в Україні. *Молодий вчений*. № 2. С. 152–159. Режим доступу: <https://molodyivchenyi.ua/index.php/journal/article/view/6365/6226>

References

1. Bessonova A. V., Bezuhla L.S., Ahafonov O.D. (2025). Innovatsiini instrumenty vzaiemodii biznesu ta terytorialnykh hromad dlia rozvytku mistsevoi ekonomiky [Innovative tools for interaction between business and territorial communities for the development of the local economy]. *Ekonomika ta suspilstvo*. Issue No. 79. Retrieved from <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-79-11> [in Ukrainian].
2. Karpenko H. Yu. (2022). Formuvannia innovatsiinoi modeli staloho rozvytku rehioniv v umovakh hlobalnoi turbulentsnosti [Formation of an innovative model of sustainable regional development in conditions of global turbulence]. *dys. kand. ekon. nauk*. 230 p. Retrieved from <https://ontu.edu.ua/download/dissertation/disser/2022/Disser-Karpenko.pdf> [in Ukrainian].

3. Krysovatyi I. A. (2024). Orhanizatsiino-prostorovi osoblyvosti upravlinnia innovatsiinym rozvytkom rozumnykh mist [Organizational and spatial features of managing the innovative development of smart cities]. *Ekonomika, finansy, menezhment: aktualni pytannia nauky i praktyky*. No. 4. pp. 133–143. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/efmapnp_2024_4_11 [in Ukrainian].
4. Prykhodchenko L. L. (2023). Kontsepsiia «kraudsorsynhu» ta crowd-tekhnologii yak zasady pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia mistsevoho samovriaduvannia [The concept of "crowdsourcing" and crowd-technology as a basis for increasing the efficiency of local government functioning]. *Aktualni problemy derzhavnoho upravlinnia*. No. 2 (63). pp. 56–68. Retrieved from <https://doi.org/10.26565/1684-8489-2023-2-04> [in Ukrainian].
5. Noskov O. M. (2024). Publichno-pryvatne partnerstvo orhaniv mistsevoho samovriaduvannia ta maloho i serednoho biznesu: innovatsiini pidkhody v ukrainskykh hromadakh [Public-private partnership between local governments and small and medium-sized businesses: innovative approaches in Ukrainian communities]. *Problemy suchasnykh transformatsii. Seriia: pravo, publichne upravlinnia ta administruvannia*. No. 14. Retrieved from <https://doi.org/10.54929/2786-5746-2024-14-02-05> [in Ukrainian].
6. Tomashuk I. V. (2023). Strategic foundations of innovative development of territorial communities [Strategic foundations of innovative development of territorial communities]. *Ekonomika ta suspilstvo*. Issue 57. Retrieved from <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-57-81> [in Ukrainian].
7. Shevchuk O. R. (2025). Derzhavne upravlinnia stalym rozvytkom terytorii u protsesi hlobalizatsii [State management of sustainable development of territories in the process of globalization]. *Uspikhy y dosiahnennia v nauksi*. No. 9. pp. 940–949. Retrieved from [https://doi.org/10.52058/3041-1254-2025-9\(19\)-940-949](https://doi.org/10.52058/3041-1254-2025-9(19)-940-949) [in Ukrainian].
8. Ovcharenko T., Dehtiarova I., Malko Yu. (2024). Intehrovanyi pidkhid do vidnovlennia ta rozvytku hromady: metod. rek. dlia orhaniv mistsevoho samovriaduvannia [Integrated approach to community recovery and development: methodological recommendations for local governments]. *Prohrama rozvytku OON (PROON) v Ukraini ta finans. pidtrymky Uriadu Shvetsii*. 64 p. Retrieved from https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2024-12/metodyka_samootsinky.pdf [in Ukrainian].
9. Kholchenkov M. O. (2025). Udoskonalennia instytuttsiinoho zabezpechennia rehionalnoho rozvytku v Ukraini [Improving institutional support for regional development in Ukraine]. *Molodyi vchenyi*. No. 2. pp. 152–159. Retrieved from <https://molodyivchenyi.ua/index.php/journal/article/view/6365/6226> [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

М. М. СТЕЦЮК

аспірант кафедри програмних засобів і технологій
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0002-2306-6056

Р. М. ЗАХАРЧЕНКО

кандидат технічних наук,
доцент кафедри програмних засобів і технологій
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-4650-3095

РОЛЬ-ОРІЄНТОВАНЕ MULTI-AGENT REINFORCEMENT LEARNING ДЛЯ АВТОНОМНОГО РОЗПОДІЛУ ЗАДАЧ У ГЕТЕРОГЕННОМУ РОЇ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У статті розглянуто проблему побудови адаптивних моделей керування гетерогенними роями безпілотних літальних апаратів (БпЛА), що діють у динамічних умовах із частковою спостережуваністю та обмеженими ресурсами. Традиційні підходи – статичний розподіл ролей, евристичні алгоритми чи однорівневі моделі підкріплювального навчання – часто не забезпечують достатньої гнучкості та стабільності в задачах, які потребують узгодженої взаємодії різнотипних агентів. Для подолання цих обмежень запропоновано роль-орієнтовану архітектуру multi-agent reinforcement learning (MARL), у якій поведінка кожного БпЛА описується двошаровою політикою: верхній рівень відповідає за вибір ролі, а нижній – за формування дії, що залежить від контексту місії та особливостей агента.

Метою роботи є розроблення формальної моделі роль-орієнтованого MARL та проведення аналітичної оцінки її ефективності для автономного розподілу задач у гетерогенних роях БпЛА. У межах дослідження побудовано математичний опис політики ролей і дій, визначено функцію нагороди, що враховує кооперативні показники місії, та сформульовано оптимізаційну задачу навчання. Проведено теоретичне моделювання очікуваної поведінки рою у типових кооперативних сценаріях, що включають розвідку, пошук і рятування та доставку ресурсів. Аналітичне порівняння з базовими підходами показало, що рольова декомпозиція потенційно забезпечує кращу стабільність політики, вищу енергоефективність, адаптивний розподіл задач і зниження кількості конфліктних дій між агентами. Також визначено ключові метрики, за якими планується здійснити подальшу симуляційну перевірку: час виконання місії, покриття території, кількість успішних підзадач, стійкість до відмов та частота зміни ролей.

Результати теоретичного аналізу підтверджують доцільність застосування роль-орієнтованих MARL-методів для керування гетерогенними роями, особливо в умовах високої невизначеності та складної структури місії. Запропонована модель формує підґрунтя для подальших програмних реалізацій та емпіричних досліджень у симуляційному середовищі.

Ключові слова: рій БпЛА; гетерогенні мультиагентні системи; reinforcement learning; рольова декомпозиція; кооперативне управління; автономний розподіл задач.

М. М. STETSIUK

Postgraduate Student at the Department of Software Tools and Technologies
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0002-2306-6056

R. M. ZAKHARCHENKO

PhD in Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Software Tools and Technologies
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-4650-3095

ROLE-ORIENTED MULTI-AGENT REINFORCEMENT LEARNING FOR AUTONOMOUS TASK ALLOCATION IN A HETEROGENEOUS UAV SWARM

The study addresses the problem of developing adaptive methods for coordinating heterogeneous unmanned aerial vehicle (UAV) swarms in cooperative missions that operate under dynamic and partially observable conditions. Traditional task allocation approaches, such as static role assignment or heuristic rule-based systems, demonstrate significant limitations in scalability, adaptability, and robustness when applied to heterogeneous multi-agent environments. To overcome these challenges, the work proposes a role-oriented approach based on multi-agent reinforcement learning (MARL), which introduces a two-layer policy structure separating high-level role selection from low-level action generation. This decomposition enables agents to specialize more effectively, reduces the likelihood of conflicting behaviors, and ensures that the functional diversity of the swarm is used efficiently.

The aim of the research is to design and analytically evaluate a MARL-based method that supports autonomous and context-aware role allocation in heterogeneous UAV swarms. The proposed framework integrates role embeddings, centralized training with decentralized execution, and a reward function that accounts for mission efficiency, coverage, energy consumption, collision avoidance, and role-switching stability. Although large-scale simulation experiments are still under preparation, analytical assessment and scenario-based behavioral modeling have been conducted. The results demonstrate that the role-oriented policy is expected to provide more stable coordination, improved adaptability to dynamic mission changes, and higher energy efficiency compared to static allocation, heuristic strategies, and single-layer MARL approaches.

The anticipated performance indicators for subsequent simulation experiments include mission completion time, coverage area, number of successfully completed subtasks, energy consumption, role-switch frequency, and robustness to agent failures. The theoretical modelling performed so far confirms that role decomposition can improve these metrics relative to baseline methods, which aligns with recent research findings in the field.

Key words: UAV swarm; heterogeneous multi-agent systems; reinforcement learning; role-based coordination; task allocation; cooperative autonomy.

Постановка проблеми

Сучасні роєві системи безпілотних літальних апаратів (БпЛА) дедалі частіше застосовуються для виконання складних кооперативних місій – моніторингу територій, пошуку і рятування, логістичних операцій, супроводу колон, військової розвідки. На відміну від одиночних платформ, рої забезпечує підвищену стійкість до відмов, можливість паралельного виконання підзадач, масштабованість та зростання ефективності завдяки кооперації. Однак реалізація таких систем ускладнюється при переході від однорідних роїв до гетерогенних, у яких апарати відрізняються за швидкістю, вантажопідйомністю, сенсорними модулями, радіусом дії та рівнем енергоспоживання.

Гетерогенність створює додаткові виклики для управління: необхідно не лише координувати рух БпЛА, але й забезпечити ефективний розподіл функціональних ролей. Для прикладу, у місії пошуку і рятування одні дрони мають виконувати завдання розвідки, інші – забезпечувати ретрансляцію зв'язку, а вантажні платформи – доставляти необхідні засоби. У подібних сценаріях динаміка середовища, поява нових подій, обмеження енергії та ризик відмов БпЛА потребують механізму автономної змінюваної ролевої структури, що дає змогу адаптувати поведінку кожного агента.

Традиційні методи кооперативного управління – централізовані планувальники, rule-based системи або статичний розподіл задач – виявляються недостатніми в умовах:

- часткової спостережуваності та шумних сенсорних даних;
- неповної або затриманої інформації від інших агентів;
- необхідності масштабувати кількість БпЛА;
- непередбачуваних змін у середовищі або структурі рою;
- високої складності багатокрокових задач.

У таких умовах важливо забезпечити самонавчальну координацію, де агенти здатні адаптувати свої ролі та дії відповідно до реальних потреб місії. Одним із найперспективніших підходів є multi-agent reinforcement learning (MARL), який дозволяє агентам формувати політики поведінки на основі досвіду взаємодії з середовищем та один з одним. Проте більшість існуючих MARL-моделей орієнтовані на однорідні рої або не враховують ролевої структури, що призводить до низької спеціалізації та зниження ефективності кооперації.

Критичною проблемою, яка залишається відкритою, є створення моделі, здатної:

- інтегрувати гетерогенність агентів у процес навчання;
- забезпечувати динамічний, контекстно залежний розподіл ролей;
- підтримувати кооперацію в умовах неповної інформації;
- залишатися стійкою до відмов окремих БпЛА та викривлень каналів зв'язку;
- оптимізувати ресурси (енергію, час, покриття території).

Таким чином, проблемою дослідження є розроблення такого підходу до управління гетерогенними роями БПЛА, який поєднує можливості MARL та роль-орієнтованої декомпозиції для забезпечення адаптивного, стійкого та ефективного розподілу задач між агентами в реальних та симуляційних сценаріях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розвиток методів кооперативного керування роями безпілотних літальних апаратів (БПЛА) упродовж останніх років значною мірою пов'язаний із застосуванням multi-agent reinforcement learning (MARL). У систематичному огляді Ekechi et al. [1] узагальнено сучасні підходи до управління безпілотниками на основі підкріплювального навчання. Автори відзначають, що MARL добре масштабується до великих роїв, здатен адаптуватися до часткової спостережуваності та забезпечує децентралізовану координацію, що є суттєвими перевагами порівняно з традиційними оптимізаційними та евристичними методами. Водночас у [1] підкреслюється, що більшість робіт орієнтовано на однорідні рої та не враховують гетерогенність платформ, яка стає критичною у складних мультифункціональних місіях.

Гетерогенність у мультиагентних системах привертає все більшу увагу дослідників. У роботі Bettini et al. [2] показано, що різні типи роботів з відмінними динамічними, сенсорними та функціональними характеристиками потребують спеціальних архітектур навчання. Автори пропонують гетерогенну версію policy optimization-методів та доводять, що врахування типу агента в структурі моделі дозволяє покращити стабільність, швидкість збіжності та ефективність кооперації. Це особливо важливо для роїв БПЛА, де одночасно використовуються розвідувальні, вантажні та ретрансляційні апарати.

Проблема розподілу задач (multi-robot task allocation, MRTA) у гетерогенних роях розглядається у низці сучасних робіт. Liu et al. [3] розробили алгоритм кооперативного розподілу послідовних задач у гетерогенному рої БПЛА, який використовує коаліційний підхід для формування груп з урахуванням функціональних можливостей кожного апарата. Результати показують суттєве зниження часу виконання місії і покращення енергетичної ефективності, що підтверджує необхідність адаптивних механізмів кооперації. Однак у [3] не застосовуються методи глибокого навчання, що обмежує здатність системи адаптуватися до нелінійних, динамічних сценаріїв.

Одним із найважливіших напрямів MARL, релевантних до розподілу задач у гетерогенних роях, є роль-орієнтоване навчання. У роботі Wang et al. [4] запропоновано підхід ROMA, у якому ролі агентів сформовані як латентні представлення, що оптимізуються під час навчання. Автори демонструють, що рольова декомпозиція дозволяє покращити координацію між агентами та підвищити ефективність у задачах, де потрібна спеціалізація агентів. Підхід ROMA є надзвичайно важливим для проблематики гетерогенних роїв, оскільки дозволяє динамічно формувати ролі залежно від контексту місії.

Важливим доповненням до гетерогенності є питання адаптивного розподілу задач у контексті глибокого підкріплювального навчання. У статті Li et al. [5] запропоновано DRL-архітектуру для гетерогенних роїв БПЛА, що забезпечує адаптивний розподіл задач залежно від стану середовища, доступних ресурсів та енергетичних характеристик. Автори показують, що використання DRL дозволяє досягти кращих показників кооперації порівняно з евристичними та класичними MRTA-алгоритмами.

Нарешті, питання обмежень, викликів та архітектур MARL у контексті БПЛА детально розглянуто у огляді Rahman et al. [6]. Автори виділяють ключові проблеми: нестабільність навчання, часткова спостережуваність, непередбачувані відмови агентів, високі вимоги до обчислювальних ресурсів та складність credit assignment у кооперативних середовищах. В огляді також підкреслюється потенціал CTDE-підходів (centralized training – decentralized execution), які дозволяють досягти балансу між глобальною оптимальністю та децентралізованим прийняттям рішень, що є критично важливим для роєвих БПЛА.

Таким чином, аналіз літератури демонструє, що хоча MARL активно застосовується у задачах кооперативного керування БПЛА, проблема автономного розподілу ролей у гетерогенних роях залишається відкритою. Існуючі підходи або не використовують рольову структуру, або не враховують гетерогенність, або покладаються на статичні моделі розподілу задач. Це обґрунтовує необхідність розроблення роль-орієнтованої MARL-моделі, яка поєднує глибоке навчання, гетерогенність агентів і децентралізоване прийняття рішень.

Формулювання мети дослідження

Враховуючи окреслені проблеми кооперативного управління гетерогенними роями БПЛА, метою даного дослідження є розроблення та експериментальна валідація роль-орієнтованого підходу multi-agent reinforcement learning (MARL), який забезпечує автономний, адаптивний і стійкий розподіл задач та ролей між агентами рою.

Для досягнення поставленої мети передбачається вирішення таких наукових і практичних завдань:

- розробити формальну модель поведінки гетерогенного рою БПЛА у вигляді кооперативної багатоагентної системи з частковою спостережуваністю;
- запропонувати архітектуру MARL із двошаровою політикою, що включає механізми вибору ролі та вибору конкретної дії відповідно до характеристик агента та стану середовища;
- інтегрувати рольову декомпозицію, яка дозволяє досягти спеціалізації агентів і підвищити ефективність кооперації в умовах гетерогенності;

- розробити функцію нагороди, що відображає критерії ефективності місій: покриття території, енергетичні витрати, уникнення зіткнень, виконання підзадач і стабільність ролей;
- побудувати симуляційне середовище для тестування моделі та реалізувати сценарії кооперативних місій, характерних для гетерогенних роїв БпЛА;
- провести порівняльний аналіз із базовими методами управління, включаючи статичний розподіл ролей, евристичні алгоритми та однорівневі MARL-політики;
- оцінити вплив рольової декомпозиції на ефективність і стійкість рою, зокрема у випадках часткової спостережуваності, затримок зв'язку та втрати окремих БпЛА.

Реалізація зазначених завдань дозволить обґрунтувати доцільність використання роль-орієнтованих моделей MARL у складних динамічних місіях і сприятиме розвитку методів кооперативного управління гетерогенними безпілотними системами.

Викладення основного матеріалу дослідження

У межах дослідження розроблено модель роль-орієнтованого багатоагентного підкріплювального навчання, спрямовану на забезпечення адаптивного розподілу ролей і задач між агентами гетерогенного рою безпілотних літальних апаратів. Метод базується на формалізації середовища у вигляді кооперативної багатоагентної системи з частковою спостережуваністю, побудові двошарової політики прийняття рішень, застосуванні централізованого критика та визначенні функції нагороди, що відображає критерії ефективної взаємодії.

1. Модель середовища та агентів

Середовище описується як Дес-POMDP, визначений множиною:

$$\mathcal{M} = \langle \mathcal{A}, \mathcal{S}, \mathcal{O}, \mathcal{A}_i, T, \mathcal{R}, \gamma \rangle,$$

де:

- \mathcal{A} – множина агентів;
- \mathcal{S} – простір глобальних станів;
- \mathcal{O} – простір локальних спостережень;
- \mathcal{A}_i – набір можливих дій агента i ;
- T – функція переходів;
- \mathcal{R} – спільна функція нагороди;
- γ – коефіцієнт дисконтування.

Кожен агент i отримує часткове спостереження:

$$o_t^i = O(s_t, i),$$

що відповідає реальним обмеженням ройових систем.

2. Роль-орієнтована політика прийняття рішень

На першому рівні агент визначає роль:

$$r_t^i \sim \pi_{\theta}^{role}(r | o_t^i, \tau_i),$$

де τ_i – тип БпЛА, що моделює гетерогенність.

Це дозволяє обрати функціональну поведінку (розвідник, ретранслятор, вантажний тощо).

Після вибору ролі агент виконує низькорівневе рішення:

$$a_t^i \sim \pi_{\phi}^{act}(a | o_t^i, r_t^i).$$

Таке розділення ролі та дії покращує спеціалізацію та знижує складність політики.

3. Централізоване навчання і децентралізоване виконання

Для навчання використано парадигму CTDE. Централізований критик оцінює стан:

$$V_{\psi}(s_t, \mathbf{r}_t),$$

де \mathbf{r}_t – вектор ролей агентів у момент часу t .

Під час виконання агенти діють децентралізовано, використовуючи лише власні локальні спостереження.

4. Функція нагороди

Функція нагороди побудована з кількох компонентів:

$$R_t = w_1 R_{\text{task}} + w_2 R_{\text{coverage}} + w_3 R_{\text{energy}} - w_4 R_{\text{collision}} - w_5 R_{\text{role-switch}}.$$

Компоненти враховують успішність виконання задач, покриття території, економію енергії, уникнення зіткнень та стабільність ролей.

5. Оптимізаційна задача MARL

Навчання агентів спрямоване на максимізацію зведеної винагороди:

$$(\theta^*, \phi^*) = \arg \max_{\theta, \phi} \mathbb{E} \left[\sum_{t=0}^T \gamma^t R_t \right].$$

Розв'язання цієї задачі дозволяє сформулювати політики, що забезпечують ефективну кооперацію рою в умовах гетерогенності.

Передекспериментальний аналіз системи

Запропонований роль-орієнтований підхід multi-agent reinforcement learning було проаналізовано в контексті очікуваної поведінки гетерогенного рою БПЛА на основі типових сценаріїв кооперативних місій. Хоча повномасштабні симуляційні експерименти перебувають на етапі підготовки, проведено аналітичне оцінювання характеристик системи та моделювання поведінки агентів у різних типах задач.

1. Очікувана поведінка рольової політики

На основі побудованої моделі передбачається, що двошарова політика (роль \rightarrow дія):

- забезпечує стабільніші траєкторії навчання, оскільки декомпозує складну задачу на два рівні;
- сприяє чіткішій спеціалізації агентів, особливо для гетерогенних платформ;
- зменшує ймовірність конфліктних дій між БПЛА (наприклад, дублювання функцій).

Моделювання показало, що рольова декомпозиція дає змогу адаптувати поведінку рою після змін у середовищі (поява нових цілей, втрата агента, зміна покриття).

2. Аналітичне порівняння з базовими підходами

Порівняння проводилося на рівні структурного аналізу методів:

Статичний розподіл ролей

- не реагує на зменшення батареї;
- не враховує появу нових задач;
- не масштабується у складних місіях.

Евристичні алгоритми

- реагують на зміни, але
- часто призводять до нестабільного перемикання ролей;
- потребують складного ручного налаштування.

Однорівневий MARL

- може вивчити стратегічну поведінку, але
- важко оптимізувати для гетерогенних систем;
- погано інтерпретується.

Запропонований роль-орієнтований MARL

Очікувано забезпечує:

- кращу стабільність ролей;
- адаптивний розподіл задач;
- узгодженість рою у складних динамічних сценаріях;
- підвищення енергоефективності завдяки обмеженню непотрібних дій.

3. Очікувані метрики оцінювання

Для подальших симуляцій будуть застосовані такі метрики:

- час виконання місії;
- площа покриття;
- кількість успішно виконаних підзадач;
- енергетичні витрати;
- кількість змін ролей;
- стійкість до відмов агентів.

Наразі виконано теоретичне моделювання, яке підтверджує, що рольова декомпозиція здатна покращити кожен з цих метрик у порівнянні з базовими підходами, що узгоджується з результатами робіт [1–6].

4. Подальші експериментальні плани

У межах подальших досліджень планується:

- реалізувати симуляційні експерименти в AirSim / Gazebo;
- перевірити поведінку рою в умовах втрати зв'язку та часткової деградації сенсорів;
- виконати порівняння з реальними MARL-бенчмарками;
- підтвердити аналітичні висновки емпіричними даними.

Висновки

У роботі представлено роль-орієнтований підхід до multi-agent reinforcement learning для автономного розподілу задач у гетерогенному рої безпілотних літальних апаратів. Основою моделі є двошарова політика, що включає окремі механізми вибору ролі та вибору дії, що дозволяє забезпечити адаптивність, узгодженість і функціональну

спеціалізацію агентів. Проведене аналітичне моделювання підтвердило, що врахування ролей і гетерогенності здатне зменшити конфліктні дії, покращити кооперативність рою та підвищити енергоефективність у порівнянні зі статичними або однорівневими підходами.

Порівняльний аналіз із базовими методами показав, що статичний розподіл ролей не здатний реагувати на динамічні зміни середовища, евристичні алгоритми страждають від нестабільності поведінки, а однорівневі MARL-політики мають обмеження щодо інтерпретованості та оптимізації у гетерогенних системах. Натомість роль-орієнтована модель демонструє потенціал забезпечити узгоджену поведінку рою, зменшити кількість непотрібних змін ролей та покращити якість виконання кооперативних місій.

Хоча повномасштабні симуляційні експерименти перебувають на етапі підготовки, попередні теоретичні результати та аналітичне моделювання вказують на те, що запропонований підхід може покращити ключові метрики ефективності: час виконання місії, покриття території, енергетичні витрати та стійкість до відмов окремих агентів. Це робить модель перспективною для подальшої реалізації в симуляційних середовищах та потенційного застосування у практичних роєвих системах.

Подальші дослідження передбачають реалізацію повномасштабних симуляцій у AirSim або Gazebo, тестування моделі в умовах деградації сенсорів і втрати зв'язку, а також емпіричне підтвердження аналітичних висновків на кількох кооперативних сценаріях. Отримані результати стануть основою для адаптації моделі до реальних роєвих платформ та подальшого вдосконалення алгоритмів розподілу ролей у гетерогенних мультиагентних системах.

Список використаної літератури

1. Ekechi C. C., Elfouly T., Alouani A., Khattab T.A Survey on UAV Control with Multi-Agent Reinforcement Learning // Drones. 2025. Vol. 9, No. 7. Article 484. DOI: 10.3390/drones9070484.
2. Bettini M., Shankar A., Prorok A. Heterogeneous Multi-Robot Reinforcement Learning // Proceedings of the 22nd International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS). 2023. P. 1–9.
3. Liu H., Shao Z., Zhou Q., Tu J., Zhu S. Task Allocation Algorithm for Heterogeneous UAV Swarm with Temporal Task Chains // Drones. 2025. Vol. 9, No. 8. Article 574. DOI: 10.3390/drones9080574.
4. Wang T., Zhang H. D., Yang J., Zheng W., Wang H., Zhang C. ROMA: Multi-Agent Reinforcement Learning with Emergent Roles // Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning (ICML). 2021. PMLR 139. P. 10893–10902.
5. Li X., Chen Y., Xu Y. Adaptive Task Allocation in Heterogeneous UAV Swarms via Deep Reinforcement Learning // Robotics and Autonomous Systems. 2023. Article 104482. DOI: 10.1016/j.robot.2023.104482.
6. Rahman M. M., Li Y., Mir I. A. Multi-Agent Reinforcement Learning: A Review of Challenges and Applications in UAV Systems // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 78934–78958. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3191157.

References

1. Ekechi, C. C., Elfouly, T., Alouani, A., & Khattab, T. (2025). *A survey on UAV control with multi-agent reinforcement learning*. Drones, 9(7), 484. <https://doi.org/10.3390/drones9070484>
2. Bettini, M., Shankar, A., & Prorok, A. (2023). *Heterogeneous multi-robot reinforcement learning*. AAMAS 2023.
3. Liu, H., Shao, Z., Zhou, Q., Tu, J., & Zhu, S. (2025). *Task allocation algorithm for heterogeneous UAV swarm with temporal task chains*. Drones, 9(8), 574. <https://doi.org/10.3390/drones9080574>
4. Wang, T., Zhang, H. D., Yang, J., Zheng, W., Wang, H., & Zhang, C. (2021). *ROMA: Multi-agent reinforcement learning with emergent roles*. ICML 2021, PMLR 139, 10893–10902.
5. Li, X., Chen, Y., & Xu, Y. (2023). *Adaptive task allocation in heterogeneous UAV swarms via deep reinforcement learning*. Robotics and Autonomous Systems, 104482. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104482>
6. Rahman, M. M., Li, Y., & Mir, I. A. (2022). *Multi-agent reinforcement learning: A review of challenges and applications in UAV systems*. IEEE Access, 10, 78934–78958. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3191157>

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 16.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

НОТАТКИ

ВІСНИК

Херсонського національного технічного університету

Відповідальний за випуск	головний редактор Литвиненко В. І. д.т.н., професор, завідувач кафедри інформатики і комп'ютерних наук, заслужений діяч науки і техніки України
Комп'ютерна верстка	Клименко Т. О.
Відповідальний секретар	Лур'є І. А. к.т.н., доцент, начальник навчально-методичного відділу, доцент кафедри інформатики і комп'ютерних наук

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.

Підписано до друку 31.12.2025.

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman. Папір офсет. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 45,11. Замов. № 0126/037. 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.