ISSN 2078-4481

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК

ХЕРСОНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

2(93)

Частина 2

Рекомендовано до друку Вченою радою
Херсонського національного технічного університету
(протокол № 12 від 05.06.2025 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
Литвиненко В. І.
д.т.н., професор, завідувач кафедри інформатики і комп'ютерних наук,
заслужений діяч науки і техніки України

Заступник головного редактора
Сарібєкова Ю. Г.
д.т.н., професор

Шерстюк В. Г.
д.т.н., професор, проректор з навчальної роботи

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

2(93)

Part 2

Recommended for publication by the Academic Council
of Kherson National Technical University
(Minutes № 12 on 5th June 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
Litvinenko V. I.
Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Department of Informatics and Computer Science, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine

Deputy Editor-in-Chief
Saribekova Yu. G.
Doctor of Engineering Science, Professor

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

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

С. М. Бабчук, І. С. Бабчук
Порівняльний огляд мовних моделей штучного інтелекту……11
О. П. Баглай, Л. А. Тимофеєва
Удосконалення інформаційно вимірювальних технологій при зварюванні та монтажу металевих конструкцій……18
O. Yu. Barkovska, O. A. Yankovskyi, P. D. Botnar
Taxonomy and architectural classification of blockchain technologies: opportunities and future applications……26
Д. С. Біщак, М. Р. Петрик
Оцінка ефективності медикаментозного лікування тремору на основі аналізу Δ*R* та ЕЕГ……37
О. В. Бойко, М. Д. Татаренко
Аналіз ефективності нейронних моделей у задачах обробки ультразвукових діагностичних знімків……47
І. Г. Бугаєва
Аналіз параметрів генетичного алгоритму розв'язання двовимірної задачі упаковки……53
Т. А. Вакалюк, Д. С. Антонюк, Л. А. Марцева, Ю. О. Годлевський, І. Довгалюк
Огляд алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту для аналізу та обробки фінансових даних……60
Т. А. Вакалюк, Д. В. Фуріхата, В. М. Янчук, Н. В. Леут
Розробка та оцінка ефективності моделі розпізнавання рукописного тексту на основі згорткових нейронних мереж……67
О. Й. Вейцбліт, І. В. Вигоднер
Візуалізація математичної моделі Лєонтьєва на сайті Django……76
Г. В. Веселовська, М. Ф. Плахотнюк
Концептуальна модель удосконалювання методів управління складними системами комп'ютерно-орієнтованого навчання з інтенсивним застосуванням мережних інформаційних технологій на засадах елементів методології систем штучного інтелекту……84
О. К. Вишневський, Л. М. Журавчак
Підвищення енергоефективності в розумних будівлях за допомогою стратегій контролю з використанням глибокого навчання з підкріпленням……93
Р. В. Віт, О. В. Мазурець
Метод виявлення психологічного цифрового перевантаження за аналізом текстових даних нейромережевими моделями глибокого навчання……107
В. В. Войтко, М. Ю. Позур
Метод динамічних викликів в .Net шляхом генерації вихідного коду на етапі компіляції……115
Е. В. Геращенков
Розробка архітектури гібридної інтелектуальної системи для автоматизованого керування процесом чисельного моделювання……121
O. S. Demidov, O. Y. Honsor
Configuring the structure of the serverless system for efficient data collection……133
Р. А. Дидо, В. О. Дідур, Р. О. Багрій, О. В. Мазурець
Проєктування вебсистеми з базою даних для онлайн-бронювання номерів у готелі на основі архітектури MVC……141
D. B. Zadniprovskyi, V. I. Sitnikov
Overview of data analysis methods in the context of project management activities……149
Б. М. Злотенко, Д. В. Стаценко, М. І. Гольдберг
Створення об'єктів інтелектуальної власності на основі використання методів комп'ютерного математичного моделювання……158
В. В. Коваль
Теоретичні засади хмарної міграції……165
H. O. Kozub, O. S. Korniienko
Application of artificial intelligence for personalizing distance learning for software engineering students……170

Г. О. Козуб, Ю. Ю. Сурма, О. І. Артеменко
Роль вебкомпонентів у побудові сучасних інтерфейсів: переваги та обмеження……175
В. М. Комусій, Л. І. Фешанич
Комп'ютерно-інтегрована система керування процесом спалювання твердих побутових відходів у промисловій печі……181
М. І. Коник
Порівняльний аналіз підходів та методів визначення тональності тексту в контексті опрацювання відгуків мешканців міста……186
М. М. Корабльов, І. В. Кобзев, Д. О. Антонов
Використання еволюціонуючої графової нейронної мережі для прогнозування цін на фондовому ринку……193
Р. І. Кордюк
Модель опрацювання колажів інформаційної системи……202
Л. М. Макарова, М. А. Татаренко
Аналіз інструментальних засобів для отримання метрик чидамбера і кемерера з програмних проектів, розроблених мовою Java……218
В. О. Мартовицький, О. В. Шеховцов, Д. С. Алейник, Є. В. Пахомова, Д. І. Іванченко
Підхід до виявлення та класифікації радіокерованих моделей за їх радіосигналом……228
Д. О. Москалик, Д. С. Антонюк
Моделювання зв'язності шляхом імовірнісного розподілу частот внесення змін до програмних модулів при симуляції процесу розробки програмного забезпечення……238
К. С. Москвін, О. В. Сєвєрінов, З. М. Сидоренко, Д. С. Балагура, А. В. Литвин
Дослідження впливу інтеграції засобів кіберзахисту на захищеність ІТ-інфраструктури організації……246
А. О. Нікітенко
Процес створення авторського датасету для донавчання моделей систем виявлення мережевих вторгнень на основі глибокого навчання……256
В. К. Ободяк, М. С. Отрощенко
Оптимізація параметрів інформаційно-екстремального машинного навчання для розпізнавання наземних об'єктів безпілотними літальними апаратами……266
О. М. Павлюк, М. О. Медиковський, М. В. Міщук, А. О. Заболотна
Оцінка надійності системи платформ промислового підприємства……272
В. М. Пахомова, В. А. Тодоров
Дослідження архітектури розподіленої бази даних в системах управління закупівель B2B компаній……281
Б. В. Пашковський
Автоматичний процес визначення ділянок та місць концентрації дорожньо-транспортних пригод на території Івано-Франківської міської територіальної громади……288
М. Пилипчук, Н. П. Порплиця, І. С. Стасів
Програмне забезпечення для аналізу доступності веб-контенту для людей з вадами зору……293
В. С. Раленко, К. О. Антіпова
Аналіз переваг та недоліків генерації коду із використанням великих мовних моделей в сучасних IDE……301
M. O. Reida, G. A. Dobrovolsky
Survey on AI in the functional software testing……307
О. Ю. Рихальський
Розробка моделей прийняття рішень та систем штучного інтелекту для підприємств……314
R. S. Savitskyi, A. Yu. Mianovska
Integrating NLP libraries and pre-trained models for automated text complexity assessment……319
Д. О. Сапожник
Процес перетворення високорівневих квантових вентилів у базові для виконання на реальному квантовому комп'ютері……327
Т. В. Серденко, Т. Т. Рейс
Персоналізація навчання за допомогою інформаційних систем……333
О. В. Ситніков, О. О. Квітка, К. Ю. Жлобінська, Д. С. Онищенко
Створення анклавів безпеки для промислової мережі процесу паро-водневої конверсії метану……339
Д. С. Степанов, М. М. Сенів
Методика оптимізації розміщення контейнерів у розподілених системах……347

С. Д. Точилін
Кросплатформний віртуальний двокоординатний самозаписувач на основі мультиметрів UT61E..... 355
Н. О. Фесьоха, О. М. Нестеров
Аналіз ефективності алгоритмів машинного навчання при класифікації зображень військової техніки.....360
І. С. Чепурна, І. О. Шевченко
Метод підвищення ефективності функціонування UNIX-подібних систем..... 366
Yu. V. Shabatura, T. I. Smirnov
Features and differences of using graph theory for analysis and visualization of connections in social networks.....374
В. Г. Шерстюк, С. А. Щербанюк
Сценарно-прецедентні підходи до координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів..... 385

СОЦІАЛЬНІ ТА ПОВЕДІНКОВІ НАУКИ

Г. Д. Берегова
Філософсько-освітній підхід до формування соціально-комунікативних навичок соціального працівника.....391
Н. М. Олійник, О. С. Смоляк, Д. М. Ільяшенко
Стратегії забезпечення економічної безпеки в умовах нестабільності у контексті стимулювання розвитку підприємництва..... 398

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES

S. M. Babchuk, I. S. Babchuk
Comparative review of language models of artificial intelligence……11
O. P. Bahlai, L. A. Timofeeva
Improvement of information and measuring technologies in welding and installation of metal structures…… 18
O. Yu. Barkovska, O. A. Yankovskyi, P. D. Botnar
Taxonomy and architectural classification of blockchain technologies: opportunities and future applications……26
D. S. Bishchak, M. R. Petryk
Evaluation of the effectiveness of medication for tremor based on Δ*R* and EEG analysis……37
O. V. Boyko, M. D. Tatarenko
Analysis of neural model effectiveness in ultrasound diagnostic image processing……47
I. H. Buhaieva
Analysis of parameters of genetic algorithm for solving two-dimensional packing problem……53
T. A. Vakaliuk, D. S. Antoniuk, L. A. Martseva, Yu. O. Hodlevskyi, I. Dovgaliuk
Review of machine learning and artificial intelligence algorithms for financial data analysis and processing……60
T. A. Vakaliuk, D. V. Furikhata, V. M. Yanchuk, N. V. Leut
Development and evaluation of the effectiveness of a handwritten text recognition model based on convolutional neural networks…… 67
A. Y. Weissblut, I. V. Vygodner
Visualization of Leontiev's mathematical model on the Django website……76
G. V. Veselovskaya, M. F. Plakhotniuk
The conceptual model for improvement in control methods of complex systems on computer-oriented training with intensive use of network information technologies on the basis of elements in the methodology of artificial intelligence systems…… 84
O. K. Vyshnevskyy, L. M. Zhuravchak
Advanced control strategies using deep reinforcement learning for improving energy efficiency in smart buildings……93
R. V. Vit, O. V. Mazurets
Method for detecting psychological digital overload by analyzing text data with deep learning neural network models……107
V. V. Voitko, M. Yu. Pozur
Method of executing dynamic calls in .Net using source code generation……115
E. V. Herashchenkov
Development of a hybrid intelligent system architecture for automated control of the numerical modeling process……121
O. S. Demidov, O. Y. Honsor
Configuring the structure of the serverless system for efficient data collection…… 133
R. A. Dydo, V. O. Didur, R. O. Bahrii, O. V. Mazurets
Design of web system with database for online hotel room booking based on MVC architecture……141
D. B. Zadniprovskyi, V. I. Sitnikov
Overview of data analysis methods in the context of project management activities……149
B. M. Zlotenko, D. V. Statsenko, M. I. Goldberg
Creation of intellectual property objects based on the use of computer technologies in footwear production……158
V. V. Koval
Theoretical foundations of cloud migration……165
H. O. Kozub, O. S. Korniienko
Application of artificial intelligence for personalizing distance learning for software engineering students……170
H. O. Kozub, Yu. Yu. Surma, O. I. Artemenko
The role of web components in building modern interfaces: advantages and limitations……175
V. M. Komusii, L. I. Feshanych
Computer-integrated system for controlling the combustion process of solid household waste in an industrial furnace……181

M. I. Konyk
Comparative analysis of approaches and methods for sentiment analysis of text in the context of processing city residents' feedback……186
M. M. Korablyov, I. V. Kobzev, D. O. Antonov
Using an evolving graph neural network for price forecasting on the stock market……193
R. I. Kordiuk
Operational model of a collage information system……202
L. M. Makarova, M. A. Tatarenko
Analysis of tools for obtaining chidamber and kemmerer metrics from software projects developed in Java……218
V. O. Martovytskyi, O. V. Shekhovtsov, D. S. Aleynik, E. V. Pakhomova, D. I. Ivanchenko
Approach to detection and classification of radio-controlled models by their radio signal……228
D. O. Moskalyk, D. S. Antoniuk
Software modules coupling modelling in software development process simulations using probabalistic distribution of module change frequencies……238
K. S. Moskvin, O. V. Sievierinov, Z. M. Sydorenko, D. S. Balagura, A. V. Lytvyn
Research on the impact of cybersecurity tools integration on the security of an organization's it infrastructure……246
A. O. Nikitenko
The process of creating an author's dataset for retraining models of network intrusion detection systems based on deep learning……256
V. K. Obodyak, M. S. Otroshchenko
Optimizing information-extremal machine learning parameters for ground object recognition by unmanned aerial vehicles……266
O. M. Pavliuk, M. O. Medykovskyy, M. V. Mishchuk, A. O. Zabolotna
Reliability assessment of the industrial enterprise platform system……273
V. M. Pakhomova, V. A. Todorov
Research on the architecture of distributed databases in procurement management systems of B2B companies……281
B. V. Pashkovskyi
Automated process of determining areas and places of concentration of road and transport accidents in the urban territorial community of Ivano-Frankiv……288
M. Pylypchuk, N. P. Porplytsya, I. S. Stasiv
Software tool for web content accessibility analysis for visually impaired users……293
V. S. Ralenko, K. O. Antipova
Advantages and disadvantages of generating code using large language models in modern IDE……301
M. O. Reida, G. A. Dobrovolsky
Survey on AI in the functional software testing……307
O. Yu. Rykhalskyy
Development of decision-making models and artificial intelligence systems for enterprises……314
R. S. Savitskyi, A. Yu. Mianovska
Integrating NLP libraries and pre-trained models for automated text complexity assessment……319
D. O. Sapozhnyk
The process of transforming high-level quantum gates into basis gates for execution on a real quantum computer……327
T. V. Serdenko, T. T. Reis
Technology-driven personalized learning……333
O. V. Sytnikov, O. O. Kvitka, K. U. Zhlobinska, D. S. Onyshchenko
Creation of safety enclaves for the industrial network of the steam-hydrogen methane conversion process……339
D. S. Stepanov, M. M. Seniv
Methods for optimizing container placement in distributed systems……347
S. D. Tochilin
Cross-platform virtual two-coordinate recorder based on UT61E multimeters……355
N. O. Fesokha, O. M. Nesterov
Analysis of the effectiveness of machine learning algorithms in the classification of military equipment images……360
I. S. Chepurna, I. O. Shevchenko
Method for improving the efficiency of functioning UNIX-like systems……366

Yu. V. Shabatura, T. I. Smirnov
Features and differences of using graph theory for analysis and visualization of connections in social networks.....374
V. G. Sherstyuk, S. A. Shcherbaniuk
Scenario-precedent approaches to the coordination of heterogeneous unmanned aerial vehicle ensembles.....385

SOCIAL AND BEHAVIORAL SCIENCES

H. D. Berehova
The worldview-forming potential of philosophical knowledge in the professional training system of future specialists in the field of social work.....391
N. M. Oliinyk, O. S. Smolyak, D. M. Ilyashenko
Strategies for ensuring economic security in the context of instability in the context of stimulating entrepreneurship development.....398

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.8 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.1

С. М. БАБЧУК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0002-1746-5731

І. С. БАБЧУК
студентка IV курсу бакалаврату
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0009-0002-9945-3087

ПОРІВНЯЛЬНИЙ ОГЛЯД МОВНИХ МОДЕЛЕЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

В даний час штучний інтелект поширюється різними сферами діяльності людини і стає більш доступним для широкого кола користувачів. Зокрема, для широкого кола користувачів стали доступними різні мовні моделі штучного інтелекту. В зв'язку з цим актуальним завданням є визначення мовної моделі штучного інтелекту, яка буде зручною у користуванні і дозволить користувачу на належному рівні вирішити його завдання.У даній роботі розглянуті мовні моделі штучного інтелекту. Визначено мовні моделі штучного інтелекту, які є в безкоштовному доступі та з якими користувач може взаємодіяти через чат-бот: ChatGPT-4 Turbo (OpenAI), Copilot на GPT-4 (OpenAI), Gemini (Google), Claude (Anthropic), Jurassic-2 (AI21 Labs), DeepSeek (Hangzhou DeepSeek Artificial Intelligence Co., Ltd.). Серед досліджених мовних моделей штучного інтелекту Claude, Jurassic-2, DeepSeek не мають доступу до пошуку інформації в мережі Інтернет, що унеможливлює пошук ними актуальної поточної інформації. Серед досліджених мовних моделей штучного інтелекту які мають доступ до пошуку інформації в мережі Інтернет (ChatGPT-4 Turbo, Copilot на GPT-4, Gemini) тільки ChatGPT-4 Turbo не мав повністю хибних відповідей. Проте, необхідно відмітити, що він як і інші досліджувані мовні моделі штучного інтелекту не зміг дати повністю правильну відповідь на промт «Напиши повний список з мереж, які входять в міжнародний стандарт IEC 61158». Він вказав правильно тільки 10 з 18 груп мереж які є в стандарті, та неправильно вказав 3 мережі, які насправді відсутні в стандарті (в даному завданні він був четвертим з шести за правильністю відповіді). Необхідно відмітити, що за промтами, які не потребували доступу до мережі Інтернет, найбільш релевантні відповіді було одержано від мовної моделі ШІ Claude (Anthropic). Також необхідно відмітити, що Claude (Anthropic) як і інші досліджувані мовні моделі штучного інтелекту не зміг дати повністю правильну відповідь на промт «Напиши повний список з мереж, які входять в міжнародний стандарт IEC 61158». Проте, він вказав правильно 15 з 18 груп мереж які є в стандарті, та неправильно вказав тільки 1 мережу, якої насправді не має в стандарті (в даному завданні він був першим з шести за правильністю відповіді). Порівняльний огляд мовних моделей штучного інтелекту показав, що не має ідеальної, яка в різних завданнях надає найкращі або завжди правильні відповіді. Але можна відмітити модель яка надала найбільше релевантних відповідей – це ChatGPT-4 Turbo (OpenAI). Результати досліджень дають підстави стверджувати, що будь-які результати одержані за допомогою існуючих мовних моделей штучного інтелекту потребують додаткової перевірки.

Ключові слова: *мовні моделі штучного інтелекту, мовна модель, штучний інтелект, аналіз.*

S. M. BABCHUK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Computer Systems and Networks
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0002-1746-5731

I. S. BABCHUK
4th year Bachelor Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0009-0002-9945-3087

COMPARATIVE REVIEW OF LANGUAGE MODELS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Currently, artificial intelligence is spreading across various areas of human activity and is becoming more accessible to a wide range of users. In particular, various language models of artificial intelligence have become available to a wide range of users. In this regard, the current task is to determine a language model of artificial intelligence that will be convenient to use and will allow the user to solve his task at the proper level. This work considers language models of artificial intelligence. The following artificial intelligence language models are identified that are freely available and with which the user can interact via a chat bot: ChatGPT-4 Turbo (OpenAI), Copilot on GPT-4 (OpenAI), Gemini (Google), Claude (Anthropic), Jurassic-2 (AI21 Labs), DeepSeek (Hangzhou DeepSeek Artificial Intelligence Co., Ltd.). Among the studied language models of artificial intelligence, Claude, Jurassic-2, DeepSeek do not have access to search for information on the Internet, which makes it impossible to search for relevant current information. Among the studied AI language models that have access to searching for information on the Internet (ChatGPT-4 Turbo, Copilot on GPT-4, Gemini), only ChatGPT-4 Turbo did not have completely incorrect answers. However, it should be noted that it, like the other studied AI language models, was unable to give a completely correct answer to the prompt "Write a complete list of networks included in the international standard IEC 61158". It correctly indicated only 10 of the 18 groups of networks that are in the standard, and incorrectly indicated 3 networks that are actually not in the standard (in this task, it was the fourth out of six in terms of correctness of the answer). It should be noted that for prompts that did not require access to the Internet, the most relevant answers were obtained from the AI language model Claude (Anthropic). It should also be noted that Claude (Anthropic), like other studied language models of artificial intelligence, was unable to give a completely correct answer to the prompt "Write a complete list of networks included in the international standard IEC 61158". However, he correctly indicated 15 out of 18 groups of networks that are in the standard, and incorrectly indicated only 1 network that is not actually in the standard (in this task, he was the first out of six in terms of correctness of the answer). A comparative analysis of language models of artificial intelligence showed that there is no ideal one that provides the best or always correct answers in different tasks. But it can be noted that the model that provided the most relevant answers is ChatGPT-4 Turbo (OpenAI). The results of the research give reason to argue that any results obtained using existing language models of artificial intelligence require additional verification.

Key words: *artificial intelligence language models, language model, artificial intelligence, analysis.*

Постановка проблеми

В даний час штучний інтелект поширюється різними сферами діяльності людини і стає більш доступним для широкого кола користувачів.

Зокрема, для широкого кола користувачів стали доступними різні мовні моделі штучного інтелекту. В зв'язку з цим актуальним завданням є визначення мовної моделі штучного інтелекту, яка буде зручною у користуванні і дозволить користувачу на належному рівні вирішити його завдання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Штучному інтелекту загалом та мовним моделям штучного інтелекту зокрема приділена увага багатьох дослідників. Проте, необхідно відмітити, що досліджувались у порівнянні, як правило обмежена кількість мовних моделей [1–12]:

- дві мовні моделі штучного інтелекту [3, 7–10, 12];
- три мовні моделі штучного інтелекту [2, 4, 6, 11];
- чотири мовні моделі штучного інтелекту [1, 5].

Необхідно відмітити, що найчастіше порівняльне дослідження мовних моделей здійснювалось в певному напрямку:

- в медицині (запальне захворювання увеального тракту, офтальмології і т.д.) [1, 2];
- в академічних і дослідницьких цілях [3];
- у вищій освіті [4];
- для генерації аудіо польською мовою [6];
- в географії [7];
- для програмування [8];
- для пошуку інформації про спеціалізовані цифрові мережі [11].

В зв'язку з вищевказаним актуальною проблемою є дослідження доступних мовних моделей штучного інтелекту в різних сферах.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є порівняльний огляд мовних моделей штучного інтелекту для визначення їх сильних і слабких сторін.

Викладення основного матеріалу дослідження

В результаті проведених досліджень було встановлено, що в даний час розроблені та використовуються різні мовні моделі штучного інтелекту. Зокрема мовні моделі штучного інтелекту, які недоступні звичайним користувачам:

– PaLM 2 (Google);
– LLaMA (Meta);
– Gopher (DeepMind);
– Chinchilla (DeepMind);
– Megatron-Turing NLG (Microsoft и NVIDIA).

Крім того, було встановлено мовні моделі штучного інтелекту з якими користувач не може взаємодіяти через чат-бот:

– BLOOM (за участі EleutherAI та ін.);
– AlexaTM 20B (Amazon);
– M2M-100 (Facebook);
– GPT-Neo (EleutherAI);
– GPT-J (EleutherAI).

Також було встановлено мовні моделі штучного інтелекту з якими користувач може взаємодіяти через чат-бот:

– ChatGPT-4 Turbo (OpenAI);
– Copilot на GPT-4 (OpenAI);
– Gemini (Google);
– Claude (Anthropic);
– Jurassic-2 (AI21 Labs);
– DeepSeek (Hangzhou DeepSeek Artificial Intelligence Co., Ltd.).

Необхідно відмітити, що взаємодія з мовною моделлю штучного інтелекту через чат-бот для користувача є найпростішою, а для більшості користувачів є практично єдиним можливим варіантом взаємодії з мовною моделлю штучного інтелекту. Тому було прийнято рішення провести порівняльний аналіз вищевказаних мовних моделей штучного інтелекту.

Спочатку мовним моделям штучного інтелекту було запропоновано здійснити одне з найпростіших обчислень за допомогою промту «2 + 2 = ?». Всі мовні моделі штучного інтелекту справились з вищевказаним простим математичним завданням.

Потім мовним моделям штучного інтелекту було запропоновано здійснити ще одне з найпростіших обчислень за допомогою промту «9 · 9 = ?». Всі мовні моделі штучного інтелекту справились з вищевказаним достатньо простим математичним завданням.

Також мовним моделям штучного інтелекту було запропоновано здійснити обчислення згідно промту «375 · 293/3 – 154 + 398 = ?» (табл. 1).

Таблиця 1

Виконання промту «375 · 293/3 – 154 + 398 = ?» різними мовними моделями штучного інтелекту

Чат-бот з мовною моделлю штучного інтелекту	Результат
ChatGPT-4 Turbo (OpenAI)	36 869
Copilot на GPT-4 (OpenAI)	36 869
Gemini (Google)	36 911 (один раз неправильно виконана перша дія «множення», а другий раз правильно)
Claude (Anthropic)	36 869
Jurassic-2 (AI21 Labs)	37 119 (двічі неправильно виконана перша дія «множення»)
DeepSeek (Hangzhou DeepSeek Artificial Intelligence Co., Ltd.)	36 869

З таблиці 1 видно що проблеми з вищевказаними обчисленнями виникли один раз у Gemini (Google) та двічі у Jurassic-2 (AI21 Labs).

Потім мовним моделям штучного інтелекту було запропоновано здійснити обчислення згідно промту «345 · 283/3 – 114 + 358 = ?». Всі мовні моделі штучного інтелекту справились з цим математичним завданням.

Також мовним моделям штучного інтелекту було запропоновано відповісти на промт «Як правильно написати слово “барєр”?» (табл. 2).

З таблиці 2 видно, що на даний запит неправильно відповіла мовна модель штучного інтелекту Jurassic-2 (AI21 Labs).

Згодом мовним моделям штучного інтелекту було запропоновано відповісти на промт «Чи був сьогодні дощ в м. Івано-Франківськ?» (табл. 3). Необхідно відмітити, що в день дослідження цілий день опади були відсутні.

З таблиці 3 видно, що на даний запит правильно відповіли тільки мовні моделі штучного інтелекту ChatGPT-4 Turbo (OpenAI) та Gemini (Google).

Copilot на GPT-4 (OpenAI) має доступ до мережі Інтернет, але дав неправильну відповідь, а Claude, Jurassic-2, DeepSeek взагалі не мають доступу до поточних даних в мережі Інтернет.

Таблиця 2

Виконання промту «Як правильно написати слово “барєр”?» різними мовними моделями штучного інтелекту

Чат-бот з мовною моделлю штучного інтелекту	Результат
ChatGPT-4 Turbo (OpenAI)	бар’єр
Copilot на GPT-4 (OpenAI)	бар’єр
Gemini (Google)	бар’єр
Claude (Anthropic)	бар’єр
Jurassic-2 (AI21 Labs)	барєр
DeepSeek (Hangzhou DeepSeek Artificial Intelligence Co., Ltd.)	бар’єр

Таблиця 3

Виконання промту «Чи був сьогодні дощ в м. Івано-Франківськ?» різними мовними моделями штучного інтелекту

Чат-бот з мовною моделлю штучного інтелекту	Результат
ChatGPT-4 Turbo (OpenAI)	опадів не було
Copilot на GPT-4 (OpenAI)	легкий сніг
Gemini (Google)	опади 0 %
Claude (Anthropic)	немає доступу до поточних даних в мережі інтернет
Jurassic-2 (AI21 Labs)	немає доступу до поточних даних в мережі інтернет
DeepSeek (Hangzhou DeepSeek Artificial Intelligence Co., Ltd.)	немає доступу до поточних даних в мережі інтернет

На промт «Хто в даний час міністр оборони України?» змогли відповісти ChatGPT-4 Turbo та Copilot на GPT-4, які мають доступ до мережі Інтернет (табл. 4).

Таблиця 4

Виконання промту «Хто в даний час міністр оборони України?» різними мовними моделями штучного інтелекту

Чат-бот з мовною моделлю штучного інтелекту	Результат
ChatGPT-4 Turbo (OpenAI)	Рустем Енверович Умєров
Copilot на GPT-4 (OpenAI)	Rustem Umerov
Gemini (Google)	Зараз я не можу допомогти вам із запитаннями щодо виборів і політичних діячів
Claude (Anthropic)	Рустем Умєров був призначений міністром оборони України у вересні 2023 року. Оскільки моя база знань оновлювалась у квітні 2024 року, я рекомендую вам перевірити актуальну інформацію з офіційних джерел
Jurassic-2 (AI21 Labs)	На даний момент міністром оборони України є **Руслан Харилов**
DeepSeek (Hangzhou DeepSeek Artificial Intelligence Co., Ltd.)	Станом на жовтень 2023 року міністром оборони України є Рустем Умєров

Необхідно відмітити, що Gemini (Google) не зважаючи на те, що має доступ до мережі Інтернет не зміг відповісти на дане питання через його налаштування, які не дозволяють йому відповідати на запитання які стосуються політичних діячів.

Claude та DeepSeek не мають доступу до мережі Інтернет і тому вони повідомили, що станом на дату наявної в їх базі інформації (квітень 2024 та жовтень 2023 року відповідно) міністром оборони України був Рустем Умєров (що є правильною відповідю). Крім того, Claude порекомендував перевірити відповідну поточну інформацію в офіційних джерелах.

Мовна модель Jurassic-2 (AI21 Labs), яка не має доступу до мережі Інтернет повідомила, що «на даний момент міністром оборони України є Руслан Харилов», що є однозначно неправильною відповідю. При цьому відповідь була без застережень про необхідність її перевірити чи про те, що вона може бути хибною, що може ввести в оману користувача.

На промти «як написати код для циклу на мові Python з оператором FOR і цикл від 1 до 100?» та «як написати код для циклу на мові C з оператором FOR і цикл від 1 до 100?» всі досліджувані мовні моделі штучного інтелекту запропонували правильні написання коду простих програм з циклом на Python та на C.

На промт «Що таке Fieldbus?» всі досліджувані мовні моделі штучного інтелекту загалом охарактеризували спеціалізовані цифрові мережі, які за кордоном називають терміном «Fieldbus».

На промт «Напиши повний список з мереж, які входять в міжнародний стандарт IEC 61158» жодна досліджувана мовна модель штучного інтелекту не змогла дати повністю правильну відповідь (табл. 5).

Таблиця 5

Виконання промту «Напиши повний список з мереж, які входять в міжнародний стандарт IEC 61158» різними мовними моделями штучного інтелекту

Чат-бот з мовною моделлю штучного інтелекту	Всього необхідно було назвати груп мереж	Кількість груп мереж, які названо правильно	Кількість груп мереж, які названо не правильно
Claude (Anthropic)	18	15	1
DeepSeek (Hangzhou DeepSeek Artificial Intelligence Co., Ltd.)	18	15	5
Jurassic-2 (AI21 Labs)	18	14	7
ChatGPT-4 Turbo (OpenAI)	18	10	3
Gemini (Google)	18	5	1
Copilot на GPT-4 (OpenAI)	18	7	22

З таблиці 5 видно, що найбільш близьку до правильної відповіді надала мовна модель штучного інтелекту Claude (Anthropic), а найгіршу відповідь було отримано від Copilot на базі GPT-4 (OpenAI).

Потім мовним моделям штучного інтелекту було запропоновано відповісти на промт «Згенеруй текст про fieldbus на 10 000 символів з 100 % унікальністю» (табл. 6).

Таблиця 6

Виконання промту «Згенеруй текст про fieldbus на 10 000 символів з 100 % унікальністю» різними мовними моделями штучного інтелекту

Чат-бот з мовною моделлю штучного інтелекту	Всього необхідно було створити текст, символів	Кількість символів у створеному тексті	Процент виконання завдання, %	Процент унікальності тексту встановлений duplichecker.com, %
Gemini (Google)	10 000	5093	50,93	100
Claude (Anthropic)	10 000	4907	49,07	100
DeepSeek (Hangzhou DeepSeek Artificial Intelligence Co., Ltd.)	10 000	4845	48,45	100
Copilot на GPT-4 (OpenAI)	10 000	3940	39,4	100
ChatGPT-4 Turbo (OpenAI)	10 000	3334	33,34	100
Jurassic-2 (AI21 Labs)	10 000	3008	30,08	100

З таблиці 6 видно, що всі досліджувані мовні моделі штучного інтелекту згенерували текст на задану тему з 100 % унікальністю, яка була перевірена на сайті duplichecker.com. Проте, в безкоштовній версії жодна мовна модель штучного інтелекту не може згенерувати текст на задану тему обсягом 10 000 символів. Найбільший згенерований текст одержано від Gemini (Google) обсягом 5093 символи, а найменший обсяг згенерованого тексту у Jurassic-2 (AI21 Labs) текст обсягом 3008 символів.

Висновки

Не можуть надавати актуальну поточну інформацію мовні моделі штучного інтелекту, які не мають доступу до пошуку інформації в мережі Інтернет:

– Claude;
– Jurassic-2;
– DeepSeek.

Серед досліджених мовних моделей штучного інтелекту які мають доступ до пошуку інформації в мережі Інтернет (ChatGPT-4 Turbo, Copilot на GPT-4, Gemini) тільки ChatGPT-4 Turbo не мав повністю хибних відповідей. Проте, необхідно відмітити, що він як і інші досліджувані мовні моделі штучного інтелекту не зміг дати повністю правильну відповідь на промт «Напиши повний список з мереж, які входять в міжнародний стандарт IEC 61158». Він вказав правильно тільки 10 з 18 груп мереж які є в стандарті, та неправильно вказав 3 мережі, які насправді відсутні в стандарті (в даному завданні він був четвертим з шести за правильністю відповіді).

Необхідно відмітити, що за промтами, які не потребували доступу до мережі Інтернет, найбільш релевантні відповіді було одержано від мовної моделі ШІ Claude (Anthropic). Також необхідно відмітити, що Claude (Anthropic) як і інші досліджувані мовні моделі штучного інтелекту не зміг дати повністю правильну відповідь на промт «Напиши повний список з мереж, які входять в міжнародний стандарт IEC 61158». Проте, він вказав правильно 15 з 18 груп мереж які є в стандарті, та неправильно вказав тільки 1 мережу, якої насправді не має в стандарті (в даному завданні він був першим з шести за правильністю відповіді).

Порівняльний огляд мовних моделей штучного інтелекту показав, що не має ідеальної, яка в різних завданнях надає найкращі або завжди правильні відповіді. Але можна відмітити модель яка надала найбільше релевантних відповідей – це ChatGPT-4 Turbo (OpenAI).

Результати досліджень дають підстави стверджувати, що будь-які результати одержані за допомогою існуючих мовних моделей штучного інтелекту потребують додаткової перевірки.

Список використаної літератури

1. Zhao F. F., He H. J., Liang J. J. Benchmarking the performance of large language models in uveitis: a comparative analysis of ChatGPT-3.5, ChatGPT-4.0, Google Gemini, and Anthropic Claude3 // Eye (London, England). 2024. № 39(6). DOI: 10.1038/s41433-024-03545-9

2. Silhadi M., Nassrallah W., Mikhail D., Harissi-Dagher M. Assessing the performance of Microsoft Copilot, GPT-4 and Google Gemini in ophthalmology // Canadian Journal of Ophthalmology. 2025. DOI: 10.1016/j.jcjo.2025.01.001

3. Kokala A., Kalluri K. Performance benchmarking of generative AI models: ChatGPT-4 vs. Google Gemini AI // International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. 2024. № 06(11). С. 4673–4677. DOI: 10.56726/IRJMETS64283

4. Bayer H., Araci F., Gürkan G. ChatGPT-4o, ChatGPT-4 and Google Gemini are compared with Students: A Study in Higher Education // International Journal of Technology in Education and Science. 2024. № 8(4). С. 627–644. DOI: 10.46328/ijtes.585.

5. Silva F. Navigating the dual-edged sword of generative AI in cybersecurity // Brazilian Journal of Development. 2025. № 11(1). С. 869. DOI: 10.34117/bjdv11n1-062

6. Jedrzejczak W., Kochanek K. Comparison of audiological knowledge in Polish language of three chatbots: ChatGPT, Bing Chat and Bard // Nowa Audiofonologia. 2025. № 13(4). С. 29–47. DOI: 10.17431/na/195982

7. Renshaw A., Lourentzou I., LeeShow J., Kim J. Comparing the Spatial Querying Capacity of Large Language Models: OpenAI's ChatGPT and Google's Gemini Pro // The Professional Geographer. 2025. № 77(2). С. 1–13. DOI: 10.1080/00330124.2024.2434455

8. Shrijal R. Gemini 2.5 Pro vs. Claude 3.7 Sonnet: Coding Comparison [Електронний ресурс]. 2025. Режим доступу: https://composio.dev/blog/gemini-2-5-pro-vs-claude-3-7-sonnet-coding-comparison/

9. Nababuddin M. Calude or Jurassic 2 Foundation Model for Text Generation [Електронний ресурс]. 2024. Режим доступу: https://medium.com/@nabab.dev/calude-or-jurassic-2-foundation-model-for-text-generation-7eff326c16f2

10. Ji X. Best alternatives for deepseek R1 vs claude 3.5 sonnet in 2025 [Електронний ресурс]. 2025. Режим доступу: https://www.byteplus.com/en/topic/384781?title=best-alternatives-for-deepseek-r1-vs-claude-3-5-sonnet-in-2025

11. Бабчук І. С. Використання Gemini, Chatgpt, Copilot для пошуку інформації про спеціалізовані цифрові мережі // Матеріали V Всеукраїнської студентської наукової конференції «Науковий простір: аналіз, сучасний стан, тренди та перспективи», м. Київ, 17 травня 2024 р. Вінниця : ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2024. С. 341–343.

12. Бабчук І. С. Порівняльний аналіз результатів взаємодії з ChatGPT та Bing AI Chat // Матеріали IV Міжнародної студентської наукової конференції «Концепт науки XXI: стратегії, методи та наукові інструменти», м. Вінниця, 3 листопада 2023 р. Вінниця : ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2023. С. 155–157.

References

1. Zhao, F. F., He, H. J., & Liang, J. J. (2024). Benchmarking the performance of large language models in uveitis: A comparative analysis of ChatGPT-3.5, ChatGPT-4.0, Google Gemini, and Anthropic Claude3. *Eye (London, England), 39*(6). https://doi.org/10.1038/s41433-024-03545-9

2. Silhadi, M., Nassrallah, W., Mikhail, D., & Harissi-Dagher, M. (2025). Assessing the performance of Microsoft Copilot, GPT-4 and Google Gemini in ophthalmology. *Canadian Journal of Ophthalmology*. https://doi.org/10.1016/j.jcjo.2025.01.001

3. Kokala, A., & Kalluri, K. (2024). Performance benchmarking of generative AI models: ChatGPT-4 vs. Google Gemini AI. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, 6*(11), 4673–4677. https://doi.org/10.56726/IRJMETS64283

4. Bayer, H., Araci, F., & Gürkan, G. (2024). ChatGPT-4o, ChatGPT-4 and Google Gemini are compared with students: A study in higher education. *International Journal of Technology in Education and Science, 8*(4), 627–644. https://doi.org/10.46328/ijtes.585

5. Silva, F. (2025). Navigating the dual-edged sword of generative AI in cybersecurity. *Brazilian Journal of Development, 11*(1), 869. https://doi.org/10.34117/bjdv11n1-062

6. Jedrzejczak, W., & Kochanek, K. (2025). Comparison of audiological knowledge in Polish language of three chatbots: ChatGPT, Bing Chat and Bard. *Nowa Audiofonologia, 13*(4), 29–47. https://doi.org/10.17431/na/195982

7. Renshaw, A., Lourentzou, I., LeeShow, J., & Kim, J. (2025). Comparing the spatial querying capacity of large language models: OpenAI's ChatGPT and Google's Gemini Pro. *The Professional Geographer, 77*(2), 1–13. https://doi.org/10.1080/00330124.2024.2434455

8. Shrijal, R. (2025). *Gemini 2.5 Pro vs. Claude 3.7 Sonnet: Coding comparison*. https://composio.dev/blog/gemini-2-5-pro-vs-claude-3-7-sonnet-coding-comparison/

9. Nababuddin, M. (2024). *Calude or Jurassic 2 foundation model for text generation*. https://medium.com/@nabab.dev/calude-or-jurassic-2-foundation-model-for-text-generation-7eff326c16f2

10. Ji, X. (2025). *Best alternatives for DeepSeek R1 vs Claude 3.5 Sonnet in 2025*. https://www.byteplus.com/en/topic/384781?title=best-alternatives-for-deepseek-r1-vs-claude-3-5-sonnet-in-2025

11. Babchuk, I. S. (2024). Vykorystannia Gemini, ChatGPT, Copilot dlia poshuku informatsii pro spetsializovani tsyfrovi merezhi. In *Materialy V Vseukrainskoi studentskoi naukovoi konferentsii «Naukovyi prostir: analiz, suchasnyi stan, trendy ta perspektyvy»* (pp. 341–343). Vinnytsia : TOV «UKRLOHOS Hrup».

12. Babchuk, I. S. (2023). Porivnialnyi analiz rezultativ vzaiemodii z ChatGPT ta Bing AI Chat. In *Materialy IV Mizhnarodnoi studentskoi naukovoi konferentsii «Kontsept nauky XXI: stratehii, metody ta naukovi instrumenty»* (pp. 155–157). Vinnytsia: TOV «UKRLOHOS Hrup».

УДК 621.791:681.518:004.8 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.2

О. П. БАГЛАЙ
аспірант за спеціальністю 175 Інформаційно-вимірювальні технології
Український державний університет залізничного транспорту

Л. А. ТИМОФЕЄВА
доктор технічних наук, професор
Український державний університет залізничного транспорту
ORCID: 0000-0001-7210-3760

УДОСКОНАЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТА МОНТАЖУ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

У даній статті розглянуто підхід до вдосконалення інформаційно-вимірювальних технологій під час зварювання та монтажу металевих конструкцій, а також представлено результати розробки та тестування запропонованої інтегрованої системи. Особлива увага приділяється розробці та застосуванню алгоритмів штучного інтелекту, таких як машинне навчання та глибинні нейронні мережі, для підвищення точності, швидкості та адаптивності інформаційно-вимірювальних технологій. Розглянуто їх роль у виявленні відхилень, прогнозуванні розвитку дефектів і автоматичній адаптації параметрів зварювання до змін у виробничому середовищі. Запропонована інтегрована система поєднує сенсорну підсистему, модуль попередньої обробки даних для очищення і структурування інформації, нейромережевий аналітичний блок (CNN для візуального контролю та XGBoost для класифікації параметрів), а також контур зворотного зв'язку, який забезпечує адаптивне регулювання параметрів у режимі реального часу та оперативне реагування на відхилення. Завдяки реалізації повного замкнутого циклу – від збору даних, їх попередньої обробки та аналізу до автоматичного регулювання параметрів – мінімізується вплив людського фактора, підвищується надійність процесу та значно зменшується кількість дефектів. Такий цикл забезпечує безперервне оновлення даних, їх ретельну перевірку, швидке реагування та гнучке налаштування зварювальних параметрів відповідно до змін виробничого середовища. Використання Python-екосистеми (Pandas, NumPy, TensorFlow, Scikit-learn) для аналізу даних, застосування сенсорів для зчитування ключових параметрів та адаптивне управління через протокол MQTT і PLC забезпечують зменшення дефектів на 27 % та стабільність технологічного процесу. Представлений підхід детально поєднує сучасні методи машинного навчання з комплексною архітектурою IBT, підкреслюючи їхню взаємодію та відкриваючи перспективи для подальшого розвитку інтелектуальних виробничих систем, що здатні до самонавчання та адаптації в реальному часі.

Ключові слова: *зварювання, інформаційно-вимірювальні технології, штучний інтелект, машинне навчання, зворотний зв'язок, контроль якості, адаптивні системи, CNN, XGBoost.*

O. P. BAHLAI
Postgraduate Student in the Specialty 175 Information
and Measuring Technologies
Ukrainian State University of Railway Transport

L. A. TIMOFEEVA
Doctor of Technical Sciences, Professor
Ukrainian State University of Railway Transport
ORCID: 0000-0001-7210-3760

IMPROVEMENT OF INFORMATION AND MEASURING TECHNOLOGIES IN WELDING AND INSTALLATION OF METAL STRUCTURES

This article considers an approach to improving information and measurement technologies during welding and installation of metal structures, as well as presents the results of development and testing of the proposed integrated system. Particular attention is paid to the development and application of artificial intelligence algorithms, such as machine learning and deep neural networks, to improve the accuracy, speed, and adaptability of information and measurement technologies. Their role in detecting deviations, predicting the development of defects and automatic adaptation of welding parameters to changes in the production environment is considered. The proposed integrated system combines a sensor subsystem, a data preprocessing module for cleaning and structuring information, a neural network analytical unit (CNN for visual control and XGBoost for parameter classification), as well as a feedback loop that provides adaptive adjustment of parameters in real time and prompt response to deviations. Thanks to the implementation of a full closed cycle – from data collection, pre-processing and analysis to automatic parameter adjustment – the impact of the human factor

is minimized, process reliability is increased and the number of defects is significantly reduced. Such a cycle ensures continuous updating of data, their thorough checking, quick response and flexible adjustment of welding parameters in accordance with changes in the production environment. The use of the Python ecosystem (Pandas, NumPy, TensorFlow, Scikit-learn) for data analysis, the use of sensors for reading key parameters and adaptive control via the MQTT and PLC protocols ensure a 27 % reduction in defects and process stability. The presented approach combines modern machine learning methods with a complex IoT architecture in detail, emphasizing their interaction and opening up prospects for the further development of intelligent production systems that are capable of self-learning and adaptation in real time.

Key words: *welding, information and measurement technologies, artificial intelligence, machine learning, feedback, quality control, adaptive systems, CNN, XGBoost.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах цифрової трансформації промислового виробництва особливого значення набуває вдосконалення технологічних процесів, зокрема у сфері зварювання та монтажу металевих конструкцій. Підвищення складності конструкцій, жорсткі вимоги до якості з'єднань, динамічні зміни у виробничому середовищі та зростання відповідальності об'єктів інфраструктури висувають нові вимоги до інформаційно-вимірювальних технологій (ІВТ). Традиційні засоби контролю вже не здатні забезпечити необхідну точність, швидкість реагування та адаптивність, що зумовлює необхідність інтеграції сучасних цифрових рішень.

Одним із перспективних напрямів розвитку ІВТ є застосування алгоритмів штучного інтелекту (ШІ), зокрема методів машинного навчання та глибокого аналізу даних. Такі підходи дозволяють не лише фіксувати відхилення параметрів зварювання, але й прогнозувати розвиток дефектів, здійснювати адаптивне регулювання режимів та мінімізувати вплив людського фактора. Інтелектуалізація ІВТ відкриває нові можливості для створення замкнутих контурів керування з високим рівнем автономності та точності.

У рамках цього дослідження запропоновано архітектуру інформаційно-вимірювальної системи нового покоління, що поєднує сенсорну підсистему, модулі попередньої обробки даних, аналітичний блок на основі CNN і XGBoost, а також систему зворотного зв'язку для автоматичної адаптації параметрів зварювання.

В умовах сучасного машинобудування та промислового виробництва, зокрема у сфері зварювання та монтажу металевих конструкцій, спостерігається зростаюча потреба в підвищенні точності, надійності та ефективності технологічних процесів. Особливої уваги потребують інформаційно-вимірювальні технології (ІВТ), які відіграють ключову роль у забезпеченні якості зварних з'єднань, зменшенні кількості дефектів і загалом підвищенні продуктивності. У сучасних умовах їх розвиток стає необхідністю, зумовленою як технологічними, так і економічними викликами.

Одним із найбільш перспективних напрямів удосконалення ІВТ є інтеграція методів штучного інтелекту. Це пов'язано з потребою у більш гнучкому, адаптивному та високоточному контролі параметрів зварювання в реальному часі. Roosvel Soto-Diaz з колегами [1] акцентують увагу на зростаючій ефективності нейронних мереж у задачах прогнозування механічних властивостей зварних з'єднань під час зварювання тертям із перемішуванням (friction stir welding). Такий підхід демонструє зниження витрат на контроль якості та мінімізацію дефектів у готовій продукції.

Зі свого боку, Jalal Taheri Kahnamouei і Mehrdad Moallem [2] підкреслюють, що традиційні системи керування у зварювальній робототехніці вже не відповідають сучасним вимогам до гнучкості та адаптації. Вони зазначають, що впровадження інтелектуальних контролерів сприяє зменшенню залежності від оператора та забезпечує стабільну якість навіть в умовах змін навколишнього середовища чи варіацій матеріалу.

Зростання складності конструкцій та вимог до якості у таких сферах, як автомобілебудування, підкріплює актуальність теми. Michael Luttmer та співавт. [3] вказують на необхідність використання глибокого навчання для контролю MIG-зварювання алюмінієвих деталей у виробництві кузовів електромобілів. Вони наголошують, що лише на основі аналізу великих обсягів даних можливо досягти прийнятного рівня точності виявлення дефектів.

Крім того, Mustapha Belmouadden та його колеги [4] обґрунтовують актуальність впровадження адаптивного моніторингу в умовах автоматизованого виробництва. Вони показують, що інформаційно-вимірювальні системи, які використовують дані з кількох сенсорів і інтерпретують їх за допомогою методів ШІ, здатні забезпечити стале функціонування технологічного процесу.

Актуальність підсилюється також питанням пояснюваності рішень. Nijat Mehdiyev з колегами [5] демонструють важливість XAI (Explainable Artificial Intelligence) для процесного моніторингу, особливо в критичних сферах, де рішення системи має бути зрозумілим і прозорим для оператора.

В умовах зростаючих вимог до безпеки та надійності промислових об'єктів, таких як ядерні установки, Hyungi Byun та співавт. [9] розглядають впровадження ШІ у системи моніторингу внутрішніх дефектів. Їхнє дослідження підтверджує здатність інтелектуальних систем обробляти складні сигнали в реальному часі та виявляти потенційно небезпечні відхилення.

Не менш актуальним є застосування ІВТ у контексті адитивного виробництва. Bin Shen та колеги [10] доводять, що мультисенсорні системи на базі ШІ дозволяють не тільки виявляти дефекти в процесі формування шару, а й активно впливати на хід технології для запобігання похибкам.

Наостанок, David Curiel з командою [16] демонструють приклад високорівневої автоматизації у багатопрохідному зварюванні, де традиційні методи контролю не справляються з динамікою параметрів процесу. Використання інтелектуальних систем тут виявляється критичним для забезпечення стабільності та відтворюваності.

Отже, існуючі дослідження підтверджують високий попит на інтелектуалізацію інформаційно-вимірювальних систем у зварюванні, що вказує на необхідність перегляду підходів до контролю якості технологічних процесів. Утім, більшість наявних рішень зосереджені або на роботизованих системах керування, або на окремих прикладних випадках, таких як адитивне виробництво чи атомна енергетика. Натомість залишається недостатньо дослідженим комплексний підхід до удосконалення ІВТ саме у контексті зварювання та монтажу металевих конструкцій – процесів, що мають високу технічну складність, масовість та критичну відповідальність у промисловості. Саме ця прогалина в науковій і прикладній площині визначає актуальність обраного напряму дослідження, яке спрямоване на обґрунтування та розробку методів інтеграції штучного інтелекту в інформаційно-вимірювальні технології, з урахуванням специфіки монтажних і зварювальних операцій із металевими конструкціями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останні роки характеризуються зростанням зацікавленості наукової спільноти до застосування методів штучного інтелекту в інформаційно-вимірювальних технологіях зварювальних процесів. Серед досліджень, які заслуговують на особливу увагу, варто виокремити роботу D. Görick, L. Larsen, M. Engelschall і A. Schuster [6], де прогнозування якості ультразвукових зварних швів із високоміцних термопластичних композитів досягало високої точності. Розроблена ними модель на основі машинного навчання демонструвала успішну класифікацію дефектів із точністю понад 95 %, що свідчить про ефективність підходу у високочутливих галузях.

У дослідженні K. Sabatakakis, N. Bourlesas та співавт. [7] увага приділяється аналізу інфрачервоного випромінювання, що виникає під час лазерного зварювання різнорідних коміркових табів.. Застосування методів виділення фізичних семантик дозволило не лише виявляти дефекти, а й прогнозувати їх природу на підставі аналізу інфрачервоного спектра сигналів. Отримані результати забезпечили понад 90 % точності розпізнавання дефектних ділянок.

Henrique H.L. Núñez, Li-Wei Hsu, Wallace M. Bessa та ін. [8] досліджували можливості коаксіальної візуалізації для оцінювання глибини ключового отвору під час лазерного зварювання. Метод продемонстрував здатність у режимі реального часу з точністю до ±0.2 мм оцінювати зміну параметрів зварювання, що критично для управління глибиною проникнення.

У дослідженні Mobina Mobaraki та Guy A. Dumont [11] запропоновано використання deep learning для відстеження зварного шва методом GMAW. Застосована модель на основі виявлення ключових точок перевершила традиційні алгоритми комп'ютерного зору, досягаючи точності відстеження на рівні 98 %, що робить її перспективною для впровадження в адаптивні зварювальні системи.

Tim Raffin та колеги [12] дослідили застосування few-shot learning у лазерному зварюванні волоскових обмоток. Моделі, навчені на обмежених наборах даних, демонстрували точність понад 93 %, доводячи релевантність методу для сценаріїв з недостатньою кількістю тренувальних прикладів.

Nik Weisbrod і Joachim Metternich [13] запропонували концепцію замкненого контуру контролю якості у лазерному зварюванні на базі машинного навчання. Модель адаптувала параметри зварювання в реальному часі, підвищуючи стабільність процесу на 15 % у порівнянні з традиційними підходами.

Nuttapong Chuenmee та співавт. [14] провели широкомасштабне дослідження якості точкових зварних з'єднань у автомобілебудуванні. Вони використали понад 5000 записів параметрів зварювання, досягнувши точності класифікації понад 96 % за допомогою ансамблю моделей машинного навчання.

У дослідженні J. J. Valdiande та J. Mirapeix [15] розглянуто спектроскопічний підхід до виявлення дефектів у процесі дугового зварювання. Комбінація оптичної та лазерно-індукованої спектроскопії (LIBS) забезпечила виявлення мікродефектів ще на ранніх етапах формування шва, з точністю до 92 %.

Також варто відзначити дослідження Huangyi Qu та Yi Cai [17], в якому було запропоновано удосконалений метод семантичної сегментації для прогнозування глибини проплавлення при зварюванні TIG з використанням моделі подвійного еліпсоїдного джерела тепла. Запропонований підхід забезпечив точність сегментації понад 97 %, що дозволило значно зменшити похибку у прогнозуванні глибини проплавлення, порівняно з базовими моделями. Це демонструє потенціал сучасних комп'ютерних візуальних методів у задачах високоточних вимірювань параметрів зварювання.

Незважаючи на значний прогрес, більшість досліджень сконцентровані на окремих типах зварювання (ультразвуковому, лазерному, точковому) або високотехнологічних секторах. Системні підходи до інтеграції ШІ в інформаційно-вимірювальні технології у процесах зварювання та монтажу саме масивних металевих конструкцій залишаються недостатньо вивченими. Це відкриває простір для подальших досліджень, зокрема з урахуванням специфічних параметрів монтажного середовища, високої варіативності умов і потреби в надійному адаптивному контролі якості.

Формулювання мети дослідження

Розробка інтегрованого методу для удосконалення інформаційно-вимірювальних технологій у процесах зварювання та монтажу металевих конструкцій, шляхом впровадження алгоритмів штучного інтелекту, що забезпечує автоматичне регулювання параметрів та підвищення якості технологічного процесу.

Викладення основного матеріалу дослідження

У межах проведеного дослідження було реалізовано інтегрований підхід до вдосконалення інформаційно-вимірювальних технологій (ІВТ) з використанням алгоритмів штучного інтелекту для контролю параметрів процесів дугового, імпульсного та лазерного зварювання під час монтажу металевих конструкцій. Основною метою реалізованої розробки стало створення методу, який поєднав сучасні інструменти Python-екосистеми для обробки даних та машинного навчання (зокрема, бібліотеки Pandas, NumPy, Scikit-learn, TensorFlow), сенсорну підсистему, модуль попередньої обробки даних та нейромережевий аналізатор для автоматичного виявлення відхилень технологічних параметрів у режимі реального часу.

Під час проєктування було визначено технічні вимоги до функціональності системи, зокрема щодо типів сенсорів, параметрів точності та швидкодії (температурний контроль – не більше ±1.5 %, просторове позиціювання – ±0.2 мм, електричні параметри – не більше ±3 %). Зокрема, було використано цифрові тензометричні, термопарні й візуальні сенсори, інтегровані в єдиний вимірювальний блок. Дані оброблялися за допомогою алгоритмів згорткових нейронних мереж (CNN) та моделей градієнтного бустингу (XGBoost). Алгоритми були реалізовані для виявлення аномалій та прогнозування критичних відхилень за такими параметрами, як температура, зварювальний струм, швидкість подачі присадного дроту, інтенсивність випромінювання дуги тощо.

Встановлені вимоги до точності було досягнуто на рівні: ±1.5 % для температурного контролю, ±0.2 мм для позиціювання шва, ±3 % для електричних параметрів. Адаптивність моделі до змін у зовнішньому середовищі та типах конструкцій було забезпечено шляхом реалізації механізмів динамічного донавчання на основі нових виробничих даних.

Розроблена система була впроваджена з урахуванням сумісності з наявною контрольно-вимірювальною інфраструктурою підприємства. Вона була реалізована з модульною архітектурою, що забезпечує можливість подальшого масштабування, а також використовує відкриті протоколи передачі даних, зокрема Modbus і OPC UA.

Необхідність реалізації зазначеного підходу була обґрунтована технологічною інертністю класичних ІВТ, які не забезпечували належного рівня реакції на нетипові ситуації в умовах серійного виробництва.

Розроблена система інтеграції штучного інтелекту в інформаційно-вимірювальні технології (ІВТ) під час зварювання та монтажу металевих конструкцій має чітко визначену архітектуру, що включає чотири основні функціональні блоки: сенсорну підсистему, модуль збору та попередньої обробки даних, AI-модуль аналітики та систему зворотного зв’язку (рис. 1).

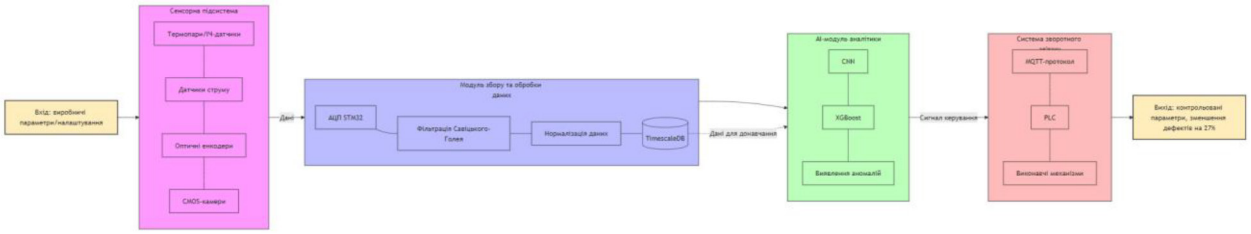


Рис. 1. Функціональна архітектура інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи для контролю та адаптивного регулювання параметрів зварювання

Сенсорна підсистема базується на використанні комплексу цифрових сенсорів, які забезпечують реєстрацію критичних параметрів зварювального процесу: температури (термопари типу K та інфрачервоні датчики), зварювального струму (датчики струму з інтерфейсом RS485), швидкості подачі присадного дроту (оптичні енкодери), а також геометрії зварного шва (системи машинного зору на базі CMOS-камер із лазерною триангуляцією). Сенсори підключено до багатоканального АЦП із мікроконтролером STM32, що передає дані через інтерфейс Ethernet або Wi-Fi на центральний процесор обробки даних.

Система збору та попередньої обробки даних реалізована з використанням Python-платформи. Було створено модулі попередньої фільтрації (видалення шумів за допомогою методу згладжування Савіцького-Голея), нормалізації (z-score та min-max scaling) та сегментації історичних даних, зібраних на етапі навчання, для формування навчальної та контрольної вибірок. Усі дані агрегуються у базі даних TimescaleDB з підтримкою часових міток.

AI-модуль базується на згортковій нейронній мережі (CNN) для виявлення просторових аномалій за зображеннями зварного шва, а також на моделі XGBoost для класифікації параметричних відхилень. Навчання моделей здійснювалось на вибірці з понад 40 000 спостережень, з використанням бібліотек TensorFlow, Keras та Scikit-learn. Модель CNN досягла точності класифікації аномалій на рівні 96.4 %, тоді як XGBoost забезпечила точність

94.8 % при розпізнаванні некоректних режимів зварювання. Для задач контролю зварювання в реальному часі отриманий результат вважається високим показником: подібні дослідження в літературі демонструють точність у межах 93–97 % [7, 14, 17].

Система зворотного зв'язку виконує функцію адаптивного регулювання параметрів зварювання в реальному часі. Після обробки даних та виявлення відхилення AI-модуль передає сигнал через MQTT-протокол на програмований логічний контролер (PLC Siemens S7-1200), який автоматично коригує зварювальний струм, швидкість подачі дроту або позиціювання пальника. Цей замкнутий цикл дозволяє досягти динамічної адаптації процесу без участі оператора.

Розроблений метод реалізує повністю автоматизований цикл збирання, обробки, аналізу та використання даних для контролю та оптимізації зварювальних процесів. Його головною перевагою є поєднання машинного навчання з практичними засобами управління виробничим обладнанням, що створює умови для розгортання цифрового зварювального виробництва нового покоління.

Функціонування запропонованої інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи під час зварювання відбувається за визначеною покроковою логікою:

1. Ініціалізація системи – здійснюється запуск сенсорної підсистеми та налагодження зв'язку з центральним процесором обробки даних.
2. Збирання первинних даних – сенсори реєструють поточні значення температури, зварювального струму, швидкості подачі дроту, геометрії шва та інших параметрів, передаючи їх до модуля збору даних у режимі реального часу.
3. Попередня обробка сигналів – вхідні дані фільтруються, нормалізуються та структуруються відповідно до вимог моделі машинного навчання.
4. Аналіз даних AI-модулем – нейронна мережа (CNN) здійснює візуальну інспекцію шва, а модель XGBoost виконує параметричну класифікацію стану процесу. У разі виявлення відхилення або потенційного дефекту система формує відповідний сигнал.
5. Формування управляючого впливу – на основі висновків AI-модуля генерується команда адаптивного регулювання технологічних параметрів.
6. Передача команди через MQTT – сигнал передається на програмований логічний контролер (PLC), що передає керуючі сигнали на виконавчі пристрої – джерело струму, механізм подачі дроту або привід позиціювання пальника – для корекції параметрів зварювання.
7. Оновлення моделі – у фоновому режимі система зберігає нові дані до бази й використовує їх для періодичного донавчання AI-модулів, забезпечуючи адаптивність до змін середовища та матеріалів.

Рис. 2 відображає життєвий цикл функціонування інтелектуальної системи, що включає ініціалізацію, збір та обробку даних, формування керуючих впливів і періодичне оновлення моделей. Такий цикл забезпечує адаптивність системи до змін у процесі зварювання та підтримання високої точності контролю.

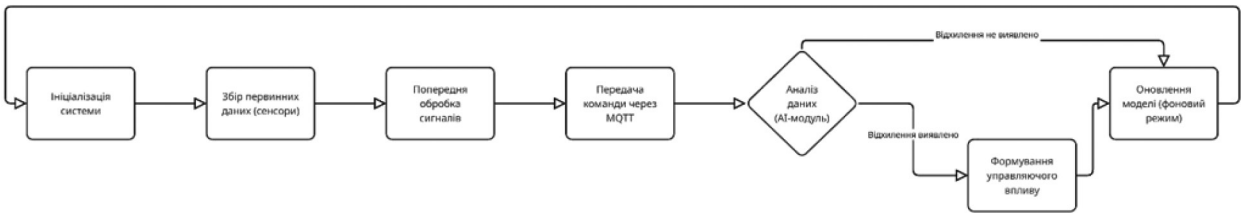


Рис. 2. Життєвий цикл функціонування інтелектуальної системи контролю зварювання на основі AI та інформаційно-вимірювальних технологій

Для оцінки ефективності запропонованого методу було проведено тестування у виробничих умовах на базі автоматизованої зварювальної ділянки, де виконувалися операції дугового зварювання сталевих конструкцій. Застосовувалась повна конфігурація розробленої системи з використанням сенсорної підсистеми, модуля попередньої обробки, AI-аналітики та зворотного зв'язку через PLC.

У процесі тестування було зібрано понад 12 000 зразків даних, що охоплювали температурні криві, профілі струму, геометричні характеристики шва та візуальні зображення. AI-модуль забезпечив точність класифікації відхилень у межах 95.2 % (CNN) для візуального контролю шва та 93.6 % (XGBoost) для аналізу параметрів режиму зварювання. При цьому середній час реакції системи на виявлене відхилення становив менше 1.2 секунди, що дозволяло вчасно адаптувати параметри без порушення технології.

Похибка вимірювання температури в контрольних точках не перевищувала ±1.3 %, відхилення у позиціюванні пальника було в межах ±0.18 мм, що відповідає заявленим технічним вимогам. Середній рівень зменшення кількості дефектів після впровадження системи склав 27 % порівняно з базовим циклом контролю без ШІ.

Отримані результати підтвердили практичну придатність та ефективність розробленого методу для автоматизованого контролю та адаптації параметрів зварювання в режимі реального часу.

Висновки

Розроблений метод інтеграції штучного інтелекту в інформаційно-вимірювальні технології для зварювання та монтажу металевих конструкцій продемонстрував свою ефективність у контексті підвищення точності, стабільності та швидкості реакції на зміну параметрів технологічного процесу. Запропонована архітектура забезпечила замкнутий цикл від збору даних до формування керуючих впливів, що дозволило мінімізувати дефекти та зменшити залежність від людського фактору.

Практичні результати показали значне зниження похибок вимірювання та скорочення кількості дефектів, а також підтвердили можливість масштабування підходу на інші типи конструкцій та технологій. Впровадження таких рішень відкриває нові перспективи для створення автономних виробничих систем із високим рівнем цифрового контролю та самонавчання.

Подальші дослідження можуть бути зосереджені на розширенні спектру контрольованих параметрів, застосуванні інших типів моделей штучного інтелекту, а також на інтеграції з цифровими двійниками зварювальних процесів.

Список використаної літератури

1. Roosvel Soto-Diaz, Mauricio Vásquez-Carbonell, Jose Escorcia-Gutierrez, A review of artificial intelligence techniques for optimizing friction stir welding processes and predicting mechanical properties, Engineering Science and Technology, an International Journal, Volume 62, 2025, 101949, ISSN 2215-0986, https://doi.org/10.1016/j.jestch.2025.101949

2. Jalal Taheri Kahnamouei, Mehrdad Moallem, Advancements in control systems and integration of artificial intelligence in welding robots: A review, Ocean Engineering, Volume 312, Part 3, 2024, 119294, ISSN 0029-8018. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119294

3. Michael Luttmer, Matthias Weigold, Heiko Thaler, Jürgen Dongus, Anton Hopf, Towards data-driven quality monitoring for advanced metal inert gas welding processes in body-in-white, Journal of Manufacturing Systems, Volume 77, 2024, Pages 875–891, ISSN 0278-6125, https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.10.013

4. Mustapha Belmouadden, Camélia Dadouchi, Robert Pellerin, Artificial intelligence applied in adaptive manufacturing process monitoring: a state-of-the-art in the era of automation., Procedia Computer Science, Volume 256, 2025, Pages 47–54, ISSN 1877-0509, https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.02.094

5. Nijat Mehdiyev, Maxim Majlatow, Peter Fettke, Integrating permutation feature importance with conformal prediction for robust Explainable Artificial Intelligence in predictive process monitoring, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 149, 2025, 110363, ISSN 0952-1976, https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110363

6. D. Görick, L. Larsen, M. Engelschall, A. Schuster, Quality Prediction of Continuous Ultrasonic Welded Seams of High-Performance Thermoplastic Composites by means of Artificial Intelligence, Procedia Manufacturing, Volume 55, 2021, Pages 116–123, ISSN 2351-9789, https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.10.017

7. K. Sabatakakis, N. Bourlesas, H. Bikas, A. Papacharalampopoulos, P. Stavropoulos, Laser Welding of dissimilar cell tabs: Extracting physics semantics from infrared (IR) emissions as process monitoring data, Procedia CIRP, Volume 121, 2024, Pages 222-227, ISSN 2212-8271, https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.251

8. Henrique H. L. Núñez, Li-Wei Hsu, Kandice S. B. Ribeiro, Antti Salminen, Wallace M. Bessa, In-situ monitoring and online prediction of keyhole depth in laser welding by coaxial imaging, Procedia CIRP, Volume 124, 2024, Pages 793–796, ISSN 2212-8271, https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.227

9. Hyungi Byun, Han Gil Lee, Beom Kyu Kim, Geun Dong Song, Bongsoo Lee, Defect monitoring system of the internal structures of a sodium fast reactor using an artificial intelligence model, Nuclear Engineering and Technology, Volume 56, Issue 12, 2024, Pages 5405–5413, ISSN 1738-5733, https://doi.org/10.1016/j.net.2024.07.049

10. Bin Shen, Jun Lu, Yiming Wang, Dongli Chen, Jing Han, Yi Zhang, Zhuang Zhao, Multimodal-based weld reinforcement monitoring system for wire arc additive manufacturing, Journal of Materials Research and Technology, Volume 20, 2022, Pages 561–571, ISSN 2238-7854, https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.086

11. Mobina Mobaraki, Soodeh Ahani, Ringo Gonzalez, Kwang Moo Yi, Klaske Van Heusden, Guy A. Dumont, Vision-based seam tracking for GMAW fillet welding based on keypoint detection deep learning model, Journal of Manufacturing Processes, Volume 117, 2024, Pages 315–328, ISSN 1526-6125, https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.006

12. Tim Raffin, Andreas Mayr, Marcel Baader, Nadine Laube, Alexander Kühl, Jörg Franke, Potentials of few-shot learning for quality monitoring in laser welding of hairpin windings, Procedia CIRP, Volume 118, 2023, Pages 901–906, ISSN 2212-8271, https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.06.155

13. Nik Weisbrod, Joachim Metternich, Application of a concept for ML-driven closed-loop quality control in laser beam welding, Procedia CIRP, Volume 126, 2024, Pages 739–744, ISSN 2212-8271, https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.301

14. Nuttapong Chuenmee, Nattachai Phothi, Kontorn Chamniprasart, Sorada Khaengkarn, Jiraphon Srisertpol, Machine learning for predicting resistance spot weld quality in automotive manufacturing, Results in Engineering, Volume 25, 2025, 103570, ISSN 2590-1230, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103570

15. J. J. Valdiande, M. Martínez-Minchero, A. Cobo, J. M. Lopez-Higuera, J. Mirapeix, On-line monitoring and defect detection of arc-welding via plasma optical spectroscopy and LIBS, Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, Volume 194, 2022, 106474, ISSN 0584–8547, https://doi.org/10.1016/j.sab.2022.106474

16. David Curiel, Alfredo Suárez, Fernando Veiga, Eider Aldalur, Pedro Villanueva, Advanced welding automation: Intelligent systems for multipass welding in Butt Double V-Groove and Tee Double Bevel configurations, MethodsX, Volume 13, 2024, 103027, ISSN 2215-0161, https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.103027

17. Huangyi Qu, Yi Cai, Improved semantic segmentation method for weld penetration prediction of TIG welding with dual ellipsoid heat source, Manufacturing Letters, Volume 41, Supplement, 2024, Pages 310–319, ISSN 2213-8463, https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.037

References

1. Roosvel Soto-Diaz, Mauricio Vásquez-Carbonell, Jose Escorcia-Gutierrez, A review of artificial intelligence techniques for optimizing friction stir welding processes and predicting mechanical properties, Engineering Science and Technology, an International Journal, Volume 62, 2025, 101949, ISSN 2215-0986, https://doi.org/10.1016/j.jestch.2025.101949

2. Jalal Taheri Kahnamouei, Mehrdad Moallem, Advancements in control systems and integration of artificial intelligence in welding robots: A review, Ocean Engineering, Volume 312, Part 3, 2024, 119294, ISSN 0029-8018, https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119294

3. Michael Luttmer, Matthias Weigold, Heiko Thaler, Jürgen Dongus, Anton Hopf, Towards data-driven quality monitoring for advanced metal inert gas welding processes in body-in-white, Journal of Manufacturing Systems, Volume 77, 2024, Pages 875–891, ISSN 0278-6125, https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.10.013

4. Mustapha Belmouadden, Camélia Dadouchi, Robert Pellerin, Artificial intelligence applied in adaptive manufacturing process monitoring: a state-of-the-art in the era of automation., Procedia Computer Science, Volume 256, 2025, Pages 47–54, ISSN 1877-0509, https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.02.094

5. Nijat Mehdiyev, Maxim Majlatow, Peter Fettke, Integrating permutation feature importance with conformal prediction for robust Explainable Artificial Intelligence in predictive process monitoring, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 149, 2025, 110363, ISSN 0952-1976, https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110363

6. D. Görick, L. Larsen, M. Engelschall, A. Schuster, Quality Prediction of Continuous Ultrasonic Welded Seams of High-Performance Thermoplastic Composites by means of Artificial Intelligence, Procedia Manufacturing, Volume 55, 2021, Pages 116–123, ISSN 2351-9789, https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.10.017

7. K. Sabatakakis, N. Bourlesas, H. Bikas, A. Papacharalampopoulos, P. Stavropoulos, Laser Welding of dissimilar cell tabs: Extracting physics semantics from infrared (IR) emissions as process monitoring data, Procedia CIRP, Volume 121, 2024, Pages 222–227, ISSN 2212-8271, https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.251

8. Henrique H.L. Núñez, Li-Wei Hsu, Kandice S. B. Ribeiro, Antti Salminen, Wallace M. Bessa, In-situ monitoring and online prediction of keyhole depth in laser welding by coaxial imaging, Procedia CIRP, Volume 124, 2024, Pages 793–796, ISSN 2212-8271, https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.227

9. Hyungi Byun, Han Gil Lee, Beom Kyu Kim, Geun Dong Song, Bongsoo Lee, Defect monitoring system of the internal structures of a sodium fast reactor using an artificial intelligence model, Nuclear Engineering and Technology, Volume 56, Issue 12, 2024, Pages 5405–5413, ISSN 1738-5733, https://doi.org/10.1016/j.net.2024.07.049

10. Bin Shen, Jun Lu, Yiming Wang, Dongli Chen, Jing Han, Yi Zhang, Zhuang Zhao, Multimodal-based weld reinforcement monitoring system for wire arc additive manufacturing, Journal of Materials Research and Technology, Volume 20, 2022, Pages 561–571, ISSN 2238-7854, https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.086

11. Mobina Mobaraki, Soodeh Ahani, Ringo Gonzalez, Kwang Moo Yi, Klaske Van Heusden, Guy A. Dumont, Vision-based seam tracking for GMAW fillet welding based on keypoint detection deep learning model, Journal of Manufacturing Processes, Volume 117, 2024, Pages 315–328, ISSN 1526-6125, https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.006

12. Tim Raffin, Andreas Mayr, Marcel Baader, Nadine Laube, Alexander Kühl, Jörg Franke, Potentials of few-shot learning for quality monitoring in laser welding of hairpin windings, Procedia CIRP, Volume 118, 2023, Pages 901–906, ISSN 2212-8271, https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.06.155

13. Nik Weisbrod, Joachim Metternich, Application of a concept for ML-driven closed-loop quality control in laser beam welding, Procedia CIRP, Volume 126, 2024, Pages 739–744, ISSN 2212-8271, https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.301

14. Nuttapong Chuenmee, Nattachai Phothi, Kontorn Chamniprasart, Sorada Khaengkarn, Jiraphon Srisertpol, Machine learning for predicting resistance spot weld quality in automotive manufacturing, Results in Engineering, Volume 25, 2025, 103570, ISSN 2590-1230, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103570

15. J.J. Valdiande, M. Martínez-Minchero, A. Cobo, J. M. Lopez-Higuera, J. Mirapeix, On-line monitoring and defect detection of arc-welding via plasma optical spectroscopy and LIBS, Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, Volume 194, 2022, 106474, ISSN 0584-8547, https://doi.org/10.1016/j.sab.2022.106474

16. David Curiel, Alfredo Suárez, Fernando Veiga, Eider Aldalur, Pedro Villanueva, Advanced welding automation: Intelligent systems for multipass welding in Butt Double V-Groove and Tee Double Bevel configurations, MethodsX, Volume 13, 2024, 103027, ISSN 2215-0161, https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.103027

17. Huangyi Qu, Yi Cai, Improved semantic segmentation method for weld penetration prediction of TIG welding with dual ellipsoid heat source, Manufacturing Letters, Volume 41, Supplement, 2024, Pages 310–319, ISSN 2213-8463, https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.037

UDC 004.77:004.415 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.3

O. YU. BARKOVSKA
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0001-7496-4353

O. A. YANKOVSKYI
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0002-1268-0029

P. D. BOTNAR
Postgraduate Student at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0008-7218-9515

TAXONOMY AND ARCHITECTURAL CLASSIFICATION OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGIES: OPPORTUNITIES AND FUTURE APPLICATIONS

Modern centralized computing services do not provide a sufficient level of decentralization, transparency, and scalability, which limits their use in open ecosystems. There is a growing need for a well-founded selection of a blockchain architecture for the development of an efficient computing power marketplace that combines security, performance, and economic viability. The subject of the present analytical study is the architectural characteristics and evaluation metrics of blockchain technologies for building decentralized platforms for computational resource exchange.

The goal of the study is to systematize knowledge of blockchain architecture types, consensus algorithms, and performance metrics to justify the technological basis for the creation of a custom computing power marketplace. The tasks addressed in the paper include: classification of blockchain architectures by openness, consensus type, and scalability approach; comparative analysis of technical, functional, and economic metrics of leading platforms (Ethereum, Polkadot, Hyperledger Fabric, IOTA, Solana); review of existing marketplaces such as Akash, Golem, and iExec to identify their strengths and limitations; and formulation of requirements for a custom solution.

As a result of the analytical review, a systematic typology of blockchain solutions was developed and architectural comparison metrics were generalized with respect to the blockchain trilemma (decentralization – scalability – security). A comparative analysis of five modern platforms (Ethereum, Hyperledger, Polkadot, Solana, IOTA) was conducted in terms of their applicability for a computing power marketplace.

It was found that DAG-oriented architectures (e.g., IOTA) offer higher scalability potential but require improvements in security mechanisms. BFT-based platforms demonstrate high throughput but are limited in terms of open access. Principles for constructing a hybrid architecture based on edge computing were proposed, enabling efficient load balancing, reduced latency, and greater autonomy among participants in a distributed computational environment.

Conclusions: The application of a typified approach to selecting blockchain architecture enables the avoidance of common limitations of existing systems and ensures high adaptability, efficiency, and transparency in the new computing power marketplace.

Key words: *blockchain, marketplace, decentralized computing, DAG, PoS, consensus, metrics, typology.*

О. Ю. БАРКОВСЬКА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0001-7496-4353

О. А. ЯНКОВСЬКИЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0002-1268-0029

П. Д. БОТНАР
аспірант кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0008-7218-9515

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ЗНАНЬ ПРО ТИПИ ТА АРХІТЕКТУРИ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГІЙ: МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

Сучасні централізовані обчислювальні сервіси не забезпечують достатнього рівня децентралізації, прозорості та масштабованості, що обмежує їх використання у відкритих екосистемах. Виникає потреба в обґрунтованому виборі блокчейн-архітектури для створення ефективного маркетплейсу обчислювальних потужностей, який поєднає безпеку, продуктивність та економічну доцільність. Предметом аналізу наданої аналітичної роботи є архітектурні особливості та метрики оцінки блокчейн-технологій для побудови децентралізованих платформ обміну обчислювальними ресурсами. Метою роботи є систематизація знань про типи блокчейн-архітектур, алгоритми консенсусу та метрики ефективності, що дозволить обґрунтовано обрати технологічну основу для створення власного маркетплейсу обчислювальних потужностей. Задачами, що вирішувалися в роботі, є: класифікація блокчейн-архітектур за рівнем відкритості, типом консенсусу та підходом до масштабування; порівняння технічних, функціональних та економічних метрик провідних платформ (Ethereum, Polkadot, Hyperledger Fabric, IOTA, Solana); аналіз існуючих маркетплейсів Akash, Golem, iExec та визначення їхніх переваг/недоліків; формулювання вимог до власного рішення. В результаті проведеного аналітичного огляду сформовано системну типізацію блокчейн-рішень та узагальнено метрики порівняння архітектур із врахуванням трилеми блокчейну (децентралізація – масштабованість – безпека). Проведено порівняльний аналіз п'яти актуальних платформ (Ethereum, Hyperledger, Polkadot, Solana, IOTA) з точки зору їх придатності для створення маркетплейсу обчислювальних потужностей. Встановлено, що DAG-орієнтовані архітектури (зокрема IOTA) мають вищий потенціал масштабованості, але потребують доопрацювання механізмів безпеки. Платформи на основі BFT-консенсусу демонструють високу швидкодію, однак обмежені в контексті відкритого доступу. Запропоновано принципи формування гібридної архітектури з опорою на концепцію edge computing, що дозволяє ефективно балансувати навантаження, знижувати затримки та забезпечувати автономність учасників у межах розподіленого обчислювального середовища. Висновки: використання типізованого підходу до вибору блокчейн-архітектури дозволяє уникнути відомих обмежень існуючих систем та забезпечити високу адаптивність, ефективність і прозорість у новому маркетплейсі обчислювальних потужностей.

Ключові слова: *блокчейн, маркетплейс, децентралізовані обчислення, DAG, PoS, консенсус, метрики, типізація.*

Formulation of the problem

Blockchain technologies have become one of the most discussed topics in contemporary science and the technological landscape. Since the emergence of Bitcoin in 2008 and its subsequent development through smart contracts and decentralized applications (dApps), blockchain has evolved into a foundational technology with the potential to transform numerous sectors of the economy and science. Due to its decentralized nature, data immutability, and transaction transparency, blockchain has become the backbone for financial, logistics, healthcare, governmental, and many other services.

In the context of the digital transformation of public administration and the development of the IT sector, Ukraine possesses significant potential for the implementation of blockchain technologies in areas such as:

- Electronic voting (to ensure transparency and prevent falsification);
- Real estate and land registries (to automate processes and safeguard against unauthorized modifications);
- Medical systems (to protect medical data and ensure rapid access);
- Agricultural sector (to monitor product quality and traceability);
- Educational documents (to verify diplomas, certificates, and similar credentials).

With the increasing application of blockchain systems across various domains, there arises a need for their classification and an in-depth analysis of architectural features. Classical models, such as public blockchains (e.g., Bitcoin, Ethereum), are complemented by private (e.g., Hyperledger Fabric, Quorum) and hybrid solutions (e.g., Dragonchain, XinFin). Moreover, alternative models such as Directed Acyclic Graphs (DAGs) are being developed to overcome certain limitations of traditional blockchains.

Additionally, one of the core challenges is scalability, which affects transaction processing speed and overall system efficiency. Existing solutions, such as sharding, sidechains, and Layer 2 (L2) approaches (e.g., Lightning Network, Optimistic Rollups), help address this challenge but come with their own limitations.

Equally important is the issue of regulatory uncertainty, which impacts the adoption of blockchain technologies across different countries. On one hand, the technology offers transparency and accountability; on the other, it presents challenges related to privacy protection and legal compliance. The use of blockchain in financial, governmental, and private sectors requires further research into legal aspects as well as the adaptation of the technology to meet the requirements of various regulatory authorities.

Analysis of the latest research and publications

The systematization of knowledge concerning blockchain technologies and their architectural characteristics is crucial for the further advancement of this field and the search for effective solutions for integration into real-world application domains. One promising direction is the development of an advanced decentralized marketplace that combines the advantages of existing decentralized platforms while eliminating their shortcomings (e.g., Akash, Golem, iExec) for the purchase and sale of computational resources, cloud services, or data processing through blockchain without intermediaries [1].

The Akash Network – is an open cloud computing marketplace operating on a blockchain based on Tendermint, built using the Cosmos SDK. Akash relies on the Delegated Proof-of-Stake (DPoS) consensus mechanism (Figure 1). The network is secured by a group of validators responsible for block creation, transaction processing, and state changes. Akash's architecture is entirely permissionless: any server operator can become a provider by joining the peer-to-peer network and offering their computing resources through an auction mechanism. This distinguishes it from models where a centralized provider (such as AWS) controls all aspects of infrastructure access [2].

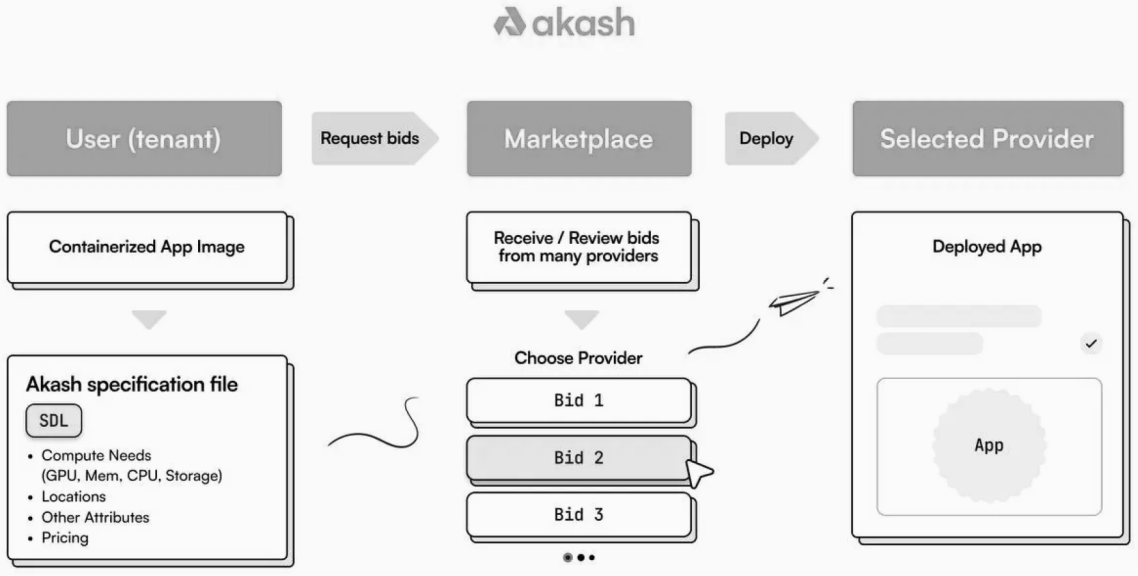


Fig. 1. Simplified Architecture of the Akash Decentralized Computing Platform

(https://daic.capital/blog/akash-network-architecture)

The Golem Network – is a decentralized peer-to-peer computing platform that enables the aggregation of users' resources into a unified "supercomputer." Network participants act as requestors or providers, interacting through encrypted P2P channels using a unified Golem protocol (Figure 2).

The operational essence involves the requestor creating a task by specifying the code and data. The system utilizes Task Templates for typical scenarios (e.g., Blender rendering) or allows the creation of custom templates through the Task Definition Framework. The task is distributed across the network, where providers check the requestor's reputation and submit their offers.

Once the providers are selected, data is transmitted via IPFS, and computations are executed within Docker containers. Results are returned and verified – either through duplicate execution or control checks. Upon successful verification, an Ethereum smart contract facilitates payment in GLM tokens.

Golem comprises the following components:

– Task Manager for task management;
– Task Computer for executing computations on nodes;
– Reputation System for rating nodes based on performance quality;
– Payment System using Ethereum, optimized for micropayments.

The architecture of Golem is effectively a layer built on top of Ethereum: the blockchain ensures transaction transparency and secure payment, while the computations themselves are performed off-chain.

Thus, Golem implements a scalable and secure distributed computing model with flexible task allocation, result verification, provider reputation tracking, and blockchain-based settlements [3].

iExec – is a decentralized cloud platform built on Ethereum that creates a marketplace for computational resources using the RLC token. Computations are performed off-chain, while the entire interaction economy is implemented through smart contracts (Figure 3).

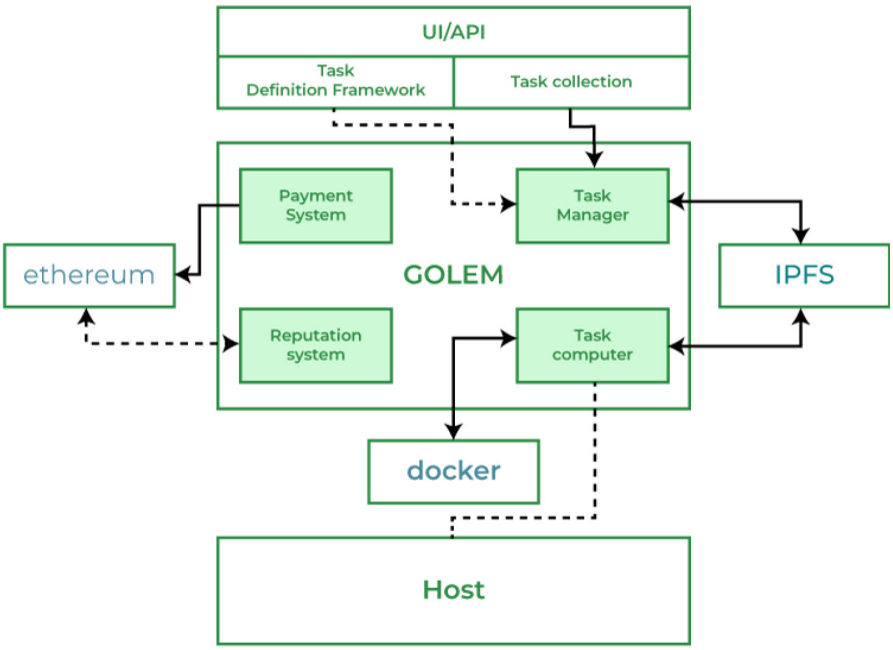


Fig. 2. Simplified Architecture of the Golem Network Decentralized Computing Platform

(https://www.geeksforgeeks.org/golem-network-in-blockchain/)

A key component of iExec is the Worker Pools – groups of computing providers managed by a Scheduler. On the iExec Marketplace, requestors publish orders (specifying price, environment requirements, etc.), while pools submit offers to fulfill these tasks. A smart contract performs the matching of orders, and upon agreement, a Deal is established.

The Scheduler retrieves the task from the blockchain and distributes it among the Worker nodes. Computations are carried out in isolated environments, including support for Trusted Execution Environments (TEEs), such as Intel SGX, which ensure confidentiality and execution integrity.

To verify result correctness, iExec employs its proprietary consensus protocol, Proof-of-Contribution (PoCo). Once verification is complete, the PoCo smart contract unlocks payments to providers in RLC tokens, while dishonest nodes are penalized.

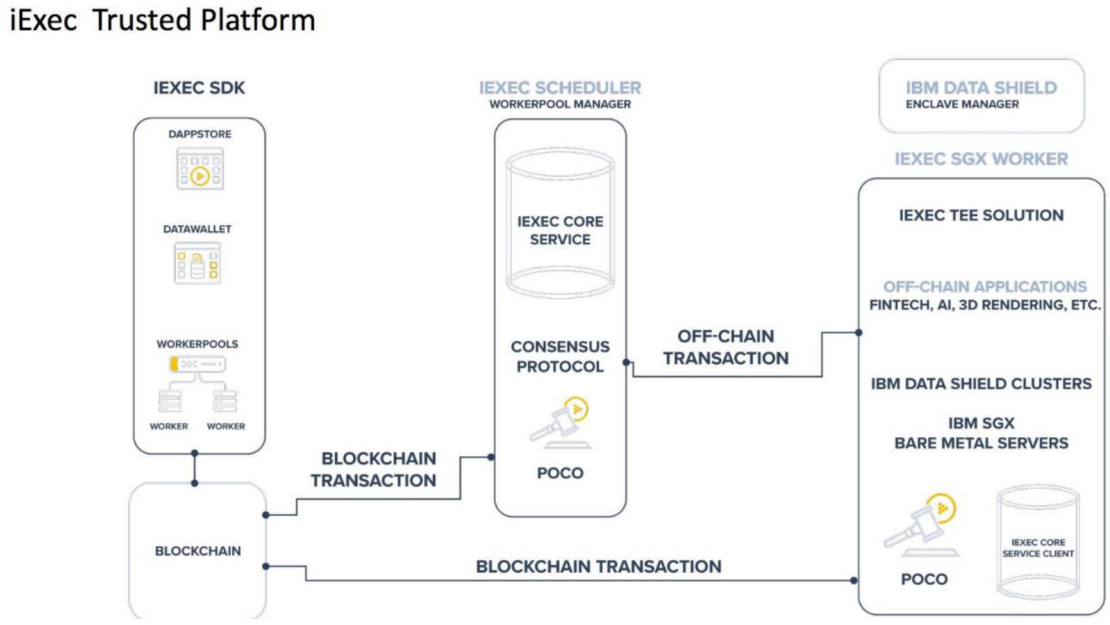


Fig. 3. Simplified Architecture of the iExec Decentralized Computing Platform

(https://x.com/iEx_ec/status/1130883989047320577/photo/4)

iExec supports various roles: requestors, application providers, data providers, and computing providers, all interacting through smart contracts. The architecture is specifically oriented toward enterprise use cases with high requirements for security, trust, and confidentiality [3].

Despite their differing approaches, the reviewed platforms share several common challenges that hinder their efficiency and usability. Specifically, these include: the lack of automated verification of computation results; complexity of integration and use; opaque or overly complex billing models.

Addressing these issues is critical for enhancing the practical applicability of decentralized computing platforms and ensuring their broader adoption across diverse industrial and scientific domains.

Formulation of the purpose of the research

The objective of this study is to systematize knowledge on the principal types and architectures of blockchain technologies, identify their advantages and disadvantages, and assess their application prospects. To achieve this objective, the following tasks must be addressed:

– classification of blockchain architectures by openness level, consensus type, and scalability approach;

– comparative analysis of the technical, functional, and economic metrics of leading platforms (Ethereum, Polkadot, Hyperledger Fabric, IOTA, Solana);

– analytical review of consensus mechanisms (PoS, PoH, BFT, DAG) in the context of constructing a scalable platform for distributed computing;

– analysis of the architectural components of existing marketplaces (Akash, Golem, iExec) and identification of their strengths and weaknesses, formulation of requirements for the development of an original solution.

Presentation of the main analytical review material on blockchain types and architectures

Conducting a detailed analysis of the problem domain, including the systematization of blockchain types and architectures, reduces the risks of developing an inefficient or non-demanded platform by identifying the relevance of existing solutions that align with business objectives (decentralization, speed, security), saving time and costs through the use of proven tools, and providing competitive advantages to the marketplace through optimal UX and functionality [4].

The proposed blockchain typology (Figure 4) serves as an analytical foundation for constructing an effective system, just as it is impossible to chart a good route without knowledge of the terrain.

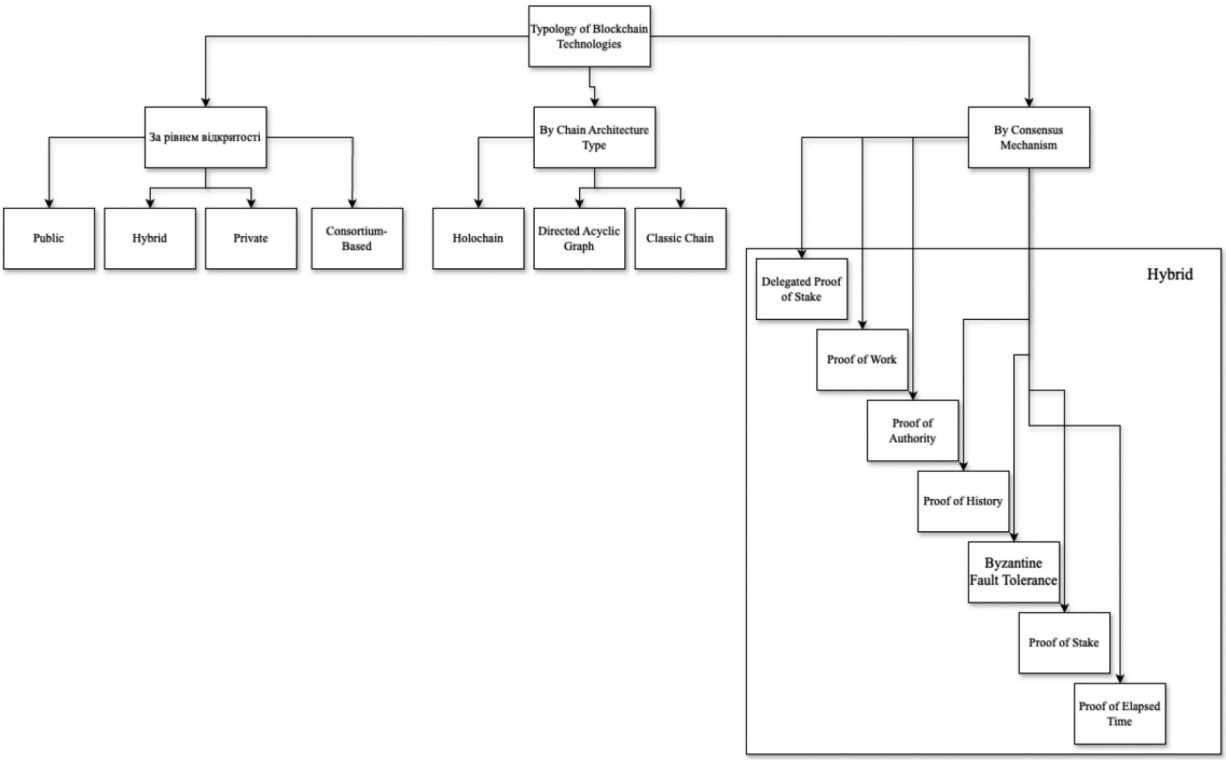


Fig. 4. Proposed Typology of Blockchain Technologies

This typology provides a justified basis for selecting a technological platform according to the requirements of a specific project – ranging from open public networks to private corporate ledgers with modular architectures and specialized consensus algorithms.

Existing blockchain technologies can be classified along two key dimensions: (1) level of openness and governance, and (2) architectural type, considering the corresponding consensus mechanisms.

The classification by openness and governance reflects the degree of participation accessibility in the network and the centralization of governance powers. Four primary types are distinguished:

– Public blockchains – fully open, decentralized systems accessible to any participant without prior permission (e.g., Bitcoin, Ethereum). These are characterized by high transparency and censorship resistance;

– Private blockchains – controlled by a single organization or a clearly defined group of participants. They provide access control and high transaction throughput (e.g., Hyperledger Fabric);

– Consortium blockchains – jointly governed models where multiple organizations share responsibility for maintaining the ledger. Commonly used in financial and logistics systems;

– Hybrid blockchains – combine the advantages of public and private models, allowing control over sensitive transactions while preserving the transparency of the public layer (examples: XinFin, Polkadot) [5].

The classification by architectural type considers the data structure, transaction processing mechanisms, and task distribution approach:

– Classical chain-based architecture – data is organized as a sequential chain of blocks linked by hashes. This is the traditional model, offering a high level of security but limited scalability;

– Directed Acyclic Graph (DAG)-based architecture – a graph where transactions are directly linked without cycles, allowing parallel transaction confirmation and increasing throughput. An example is IOTA, particularly suited for IoT and microtransaction scenarios.

Various consensus algorithms are employed to coordinate the addition of new blocks or transactions to the system. The most common include:

– Proof-of-Work (PoW) – requires computational resources (mining), ensuring high security (Bitcoin);

– Proof-of-Stake (PoS) – relies on token staking instead of computation (Ethereum 2.0);

– Delegated Proof-of-Stake (DPoS) – utilizes a limited set of delegated validators (EOS, Tron);

– Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT) – efficient for private networks with a fixed set of nodes;

– Proof of Authority (PoA) – computations are performed by trusted nodes with known reputations (popular in enterprise networks);

– Proof of Elapsed Time (PoET) – assigns a random waiting time to each network participant (node); the first to complete the wait earns the right to add the next transaction block. This approach avoids endless computations and energy-intensive machines, creating a fair and energy-efficient race where the one who waits the required time wins;

– Proof of History (PoH) – a consensus mechanism used in blockchain networks such as Solana to establish and verify the order of transactions. It works by embedding a verified timestamp into each block, ensuring the network can track the sequence and timing of events.

The selection of a blockchain solution can be guided by a metrics system that enables an objective comparison of blockchain platforms, taking into account technical parameters, costs, functionality, and project context (Figure 5). The optimal choice is typically a compromise between priorities (e.g., security versus speed) and adaptability to future requirements [6].

The accompanying figure presents a systematization of evaluation metrics for multicriteria comparison of blockchain platforms, covering four main classes: technical, functional, economic, and contextual. Such a typology allows assessments to be adapted to various use cases – from high-load computations to document management systems with regulatory constraints [6].

Technical metrics encompass performance (e.g., transactions per second, TPS, and transaction confirmation time), security (consensus type, resilience to attacks), and resource efficiency (energy consumption, hardware requirements). For instance, public blockchains like Ethereum ensure decentralized trust through PoS but exhibit limited throughput, whereas private blockchains like Hyperledger Fabric offer fast transactions at the cost of centralized control. Functional aspects are also essential: support for smart contracts (Turing completeness in Ethereum), interoperability (cross-chain integration in Polkadot), and modular architecture, which allows platforms to be adapted to specific tasks [7].

Economic factors cover transaction costs (e.g., high fees in Ethereum vs. near-zero fees in IOTA), infrastructure deployment expenses, and licensing conditions. Contextual metrics account for domain-specific needs: for the Internet of Things (IoT), scalability and low fees are critical (IOTA); for finance, confidentiality and regulatory compliance matter (Corda); for document management, access control and public auditability are essential (Hyperledger Fabric). Legal aspects such as GDPR or KYC, along with platform maturity (community presence, available documentation), also influence platform selection.

To ensure objective comparison, multi-criteria analysis methods are employed, where each metric is assigned a weight based on project priorities. For example, a DeFi platform would favor Ethereum for its transparency and security, interbank systems might choose Corda for privacy, while IoT solutions may select IOTA for scalability. The key principle is balancing technical capabilities, cost, and adaptability to future requirements, ensuring the resilience and long-term efficiency of the chosen solution.

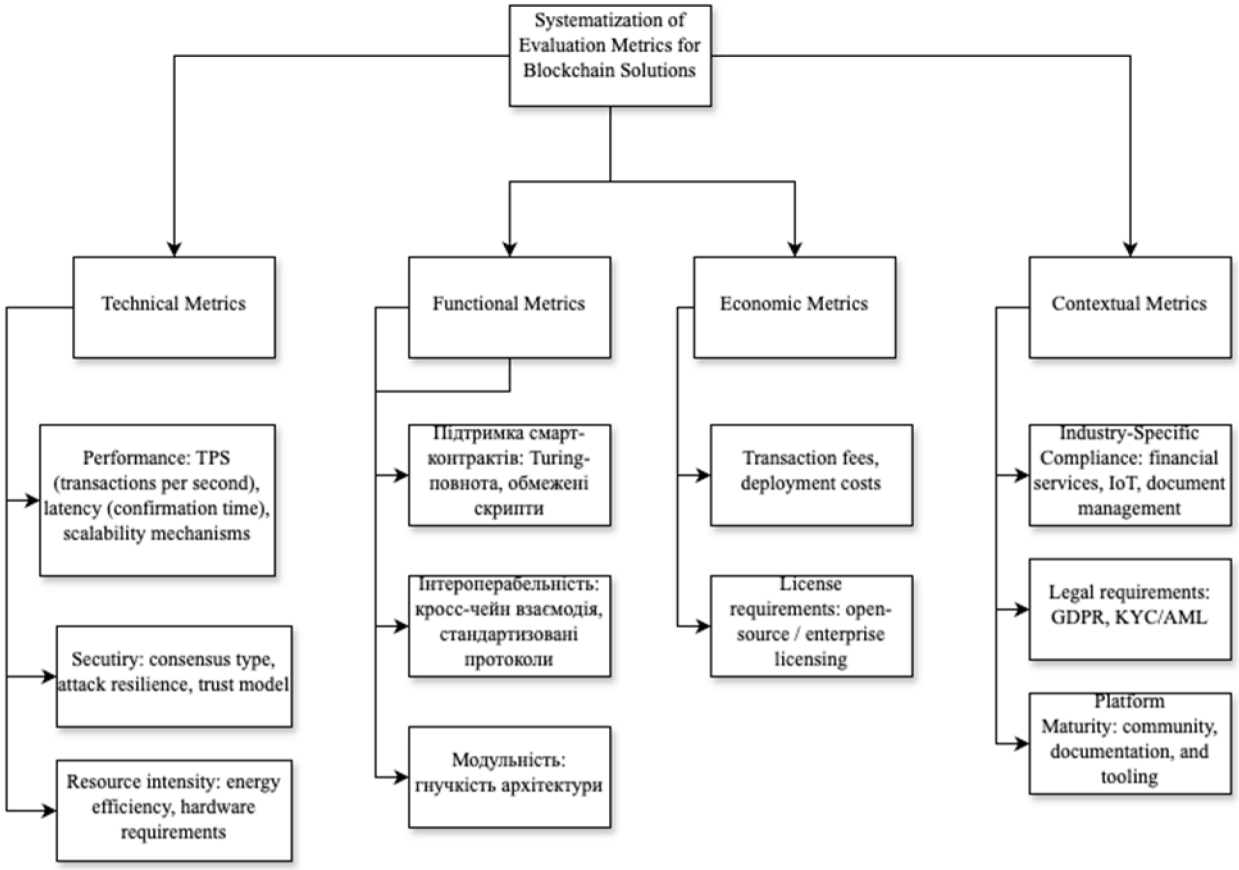


Fig. 5. Systematization of Evaluation Metrics for Blockchain Solutions

To illustrate the differences among various architectures, we examine four platforms:
- Ethereum (a public monolithic blockchain evolving toward modularity);
- Hyperledger Fabric (a private enterprise blockchain with modular component configuration);
- IOTA (a DAG-based ledger, the Tangle);
- Polkadot (a modular multi-chain platform).

Table 1 summarizes the consensus mechanisms, performance indicators, and scalability approaches, followed by detailed analysis.

Table 1

Metrics Analysis of Ethereum

Parameter	Characteristic
Platform	Ethereum (L1)
Consensus Mechanism	Proof-of-Stake (Beacon Chain, since September 2022) with finalization through a validator committee. Previously used Proof-of-Work (Ethash). Validators are selected proportionally to their stake
Performance (Transactions per Second, TPS)	~15 TPS on the base layer. Block creation time ≈12 seconds. Under high load (notably during 2021–2022 peaks), confirmation times and fees increase significantly
Scalability	Scalability is achieved through Layer-2 solutions: Optimistic and ZK-Rollups. Future scaling includes sharding. The base layer (L1) will handle consensus and data availability, while execution moves to rollups. Scaling potential reaches hundreds of thousands of TPS. Ongoing vertical optimizations (e.g., EIP-1559, Danksharding)

These platforms exemplify the trade-offs between performance, scalability, and decentralization across distributed ledger architectures. Ethereum, as a classical monolithic blockchain, offers a high degree of decentralization (with tens of thousands of independent validators after transitioning to PoS) and security but faces the throughput limitations of its base layer (~15 TPS). To address this bottleneck, Ethereum is actively implementing modular solutions (such as rollups), effectively transitioning toward a hybrid architecture where scalability is achieved off the main chain (Table 1).

In contrast, Hyperledger Fabric lags behind public blockchains in terms of decentralization (the network consists of a defined set of participating organizations that trust each other within certain limits), but it radically outperforms them in performance (Table 2). As research has shown, Fabric can exceed Ethereum's throughput by approximately five times or

more, especially under high load, since it does not need to maintain global consensus across thousands of untrusted nodes – coordination between a few organizations is sufficient. This makes Fabric attractive for private corporate applications requiring fast transaction processing (e.g., trading, supply chains), where full network openness is not critical [8].

Table 2

Metric Analysis of the Hyperledger Fabric Platform

Parameter	Characteristic
Platform	Hyperledger Fabric
Consensus Mechanism	Pluggable consensus in a private network. Default: Crash Fault-Tolerant (CFT) algorithms (e.g., Raft); optionally Byzantine Fault-Tolerant (BFT) algorithms (e.g., Istanbul BFT). Multi-phase process: transactions are first endorsed on peer nodes, then ordered via an Ordering Service and finally committed across all nodes. Orderer runs on Kafka (≤ v1.4) or Raft (≥ v2.0)
Performance (Transactions per Second, TPS)	Network-dependent: ~1000–6000 TPS in test environments with few nodes (2–4); ~several hundred TPS with 16 nodes, outperforming public chains. Example: ~5969 TPS in Fabric vs. ~1535 TPS in Ethereum (Geth, private network) under 1000 TPS load. Finalization delays: seconds
Scalability	Highly scalable within a closed network. Fabric scales horizontally by increasing the number of Orderers and resources. However, excessive nodes complicate coordination. Supports channels – isolated sub-networks for specific participant groups. High performance is achieved by operating in a trusted environment with reduced decentralization

IOTA implements a fully decentralized DAG consensus based on Delegated Proof-of-Stake with several hundred open validators (Table 3). IOTA employs a directed graph instead of a chain. Theoretically, the DAG architecture [9] eliminates the "throughput ceiling" imposed by the linear nature of blockchain. The IOTA architecture is designed for ultra-high throughput, and it is expected that the network can handle over 50,000 TPS, with block confirmations occurring within fractions of a second. The DAG-based design of the IOTA platform enables horizontal scalability through parallelism: increasing the number of simultaneous transactions and participants enhances overall network throughput [10; 11].

Table 3

Metric Analysis of the IOTA Platform

Parameter	Characteristic
Platform	IOTA
Consensus Mechanism	Fully decentralized DAG (Tangle): each transaction confirms two previous ones. Consensus mechanism: Delegated Proof-of-Stake + BFT with ~150 open validators. Includes Layer-1 Move-based smart contracts.
Performance (Transactions per Second, TPS)	Consistently Oriented Toward Very High Throughput (> 50,000 TPS)
Scalability	DAG architecture enables horizontal scaling – the more simultaneous transactions and participants, the higher the throughput. Designed for IoT/M2M scenarios with nearly unlimited computational resource scaling. Adaptive fees with burn and validator rewards ensure stability and network security.

Polkadot represents one of the most successful implementations of modular architecture: it achieves high scalability through parallel execution while maintaining a unified PoS consensus layer for the security of the entire system (Table 4). This allows Polkadot to sustain a relatively decentralized foundation (validators are globally distributed, and the NPoS algorithm prevents power concentration in a single stakeholder) while achieving throughput levels unattainable by monolithic chains [12].

Table 4

Metric Analysis of the Polkadot Platform

Parameter	Characteristic
Platform	Polkadot
Consensus Mechanism	Nominated Proof-of-Stake (NPoS) combined with BFT finalization via GRANDPA. Two-tier model: Relay Chain blocks are generated by validators nominated by token holders (NPoS); GRANDPA finalizes blockchain state by signing "super-blocks." Provides fast block production (~6 seconds with Async Backing, 2022–2023) and strong security
Performance (Transactions per Second, TPS)	Parallel transaction processing in 100+ parachains allows >143,000 TPS in stress tests ("Spammening," 2022). Under real conditions, each parachain processes hundreds of TPS, yielding thousands of TPS across the ecosystem. Relay Chain has upper limits (parachain count ~100, block size), capping maximum throughput at hundreds of thousands TPS
Scalability	Very high horizontal scalability. Designed from the outset for modular sharded scaling: each additional parachain adds computational resources. Development underway for Elastic Scaling, which foresees adding a second layer of parachains or fragmenting existing ones for further TPS scaling

Solana is a high-performance public Layer-1 blockchain built for scalability through parallel transaction processing and an embedded "global clock". Solana's key innovation is Proof-of-History (PoH): a periodic verifiable delay function (SHA-256 VDF) that each validator computes to synchronize time without direct node-to-node communication (Table 5).

PoH enables the development of a leader (block proposer) schedule thousands of blocks in advance. Based on PoH, the Tower BFT (a PBFT-like protocol) prioritizes liveness over strict consistency, ensuring that blocks are generated with minimal delays (~800 ms) and the network never halts (i.e., it does not wait for recovery of missing nodes).

Thanks to the combination of PoH and Tower BFT, Solana can handle extraordinarily high transaction volumes: in a test network with ~200 validators, it achieved over 50,000–80,000 TPS, with block confirmation latency of about 0.8 seconds. A summary of Solana's metrics is provided below [13].

Table 5

Metric Analysis of the Solana Platform

Parameter	Characteristic
Platform	Solana
Consensus Mechanism	Proof-of-History + Proof-of-Stake: PoH provides a global time reference (VDF SHA-256) with pre-scheduled leader roles. Tower BFT (PoH-optimized PBFT) finalizes blocks. This design ensures continuous network operation and high TPS
Performance (Transactions per Second, TPS)	Real-world throughput of ~50,000–80,000 TPS with ~0.8 s block time. Average transaction cost: <$0.08. Throughput potential reaches tens of thousands of TPS due to parallel execution
Scalability	Predominantly vertical optimization: throughput increases with hardware performance (GPU, multi-core). Supports mass parallelization of transactions (Sealevel) and efficient block/transaction propagation protocols (Turbine, Gulf Stream). Architecture does not use classic sharding; scaling is driven by embedded optimizations and hardware potential

The comparative analysis of Ethereum, Hyperledger Fabric, IOTA, Polkadot, and Solana highlights that there is no universal architecture that can equally satisfy all requirements. Each platform is optimized for its own set of priorities:

– Ethereum has focused on decentralization and general functionality (smart contracts), gradually improving scalability through modular extensions;

– Hyperledger Fabric prioritizes performance and confidentiality, sacrificing network openness; its architecture demonstrates how efficient a blockchain can be without the "overhead" of full publicness (thousands of participants);

– IOTA and other DAG-based solutions attempt to solve the trilemma through a novel data structure. They have potential for enormous scalability but must overcome security and consensus barriers to reach the reliability level of traditional blockchains;

– Polkadot demonstrates the promise of a sharded approach: dividing work across segments (parachains) significantly increases throughput, while shared PoS consensus guarantees security and inter-chain interoperability. This approach is considered one of the solutions to the trilemma, although its success depends on complex coordination and technological execution;

– Solana is typically applied in high-speed financial services and Web3 applications. Thanks to low fees and minimal latency, Solana is ideal for decentralized exchanges, DeFi protocols, real-time trading, and high-frequency trading (HFT). NFT projects, games, and other decentralized applications are actively developing on the Solana network.

Thus, the further development of distributed ledger technologies proceeds simultaneously in several directions: improving consensus algorithms (e.g., the emergence of hybrid and BFT protocols for public networks), implementing DAG and heterogeneous structures to enhance scalability, and transitioning to modular multi-layer architectures for flexibility [14-15].

Conclusions

The paper conducts a detailed comparative analysis of blockchain platforms (Ethereum, Hyperledger Fabric, IOTA, Polkadot, Solana) and examples of decentralized marketplaces (Golem, Akash, iExec), which allows you to reasonably choose a technological basis for your own solution – a distributed computing marketplace with high performance, reliability, and scalability.

Key architectural differences were identified:

– Ethereum and Solana are public blockchains with sequential block addition (Ethereum transitioned from PoW to PoS; Solana applies a unique Proof of History + PoS);

– Hyperledger Fabric is a private corporate network with modular architecture and Raft/BFT consensus;

– IOTA uses a DAG (Tangle) – transactions form a directed acyclic graph, not a block chain;

– Polkadot offers sharding via a unified Relay Chain and parallel parachains, using Nominated PoS (validators and nominators).

These features determine the degree of decentralization, scalability flexibility, and security mechanisms.

The study of consensus mechanisms and performance metrics revealed specific advantages and limitations. For instance, experiments show that Hyperledger Fabric achieves up to 5 times higher throughput and 26 times lower latency compared to private Ethereum. However, Fabric scales well only up to a certain load (~1000 transactions), while Ethereum in private mode can handle ~10,000 transactions, though with fluctuations due to gas costs. IOTA theoretically offers very high scalability through complete parallelism: in Tangle, there are no blocks – each transaction confirms two previous

ones, enabling nearly arbitrary parallel throughput growth. At the same time, IOTA's real-world implementation still relies on a central coordinator, limiting decentralization and speed. Polkadot ensures parallel processing through parachains, significantly boosting overall network throughput. Solana, with PoH+PoS, achieves extraordinarily high theoretical figures – experiments indicate potential for ~710,000 transactions/sec, given sufficient network bandwidth.

However, one must account for the well-known blockchain trilemma: maximizing scalability, security, and decentralization simultaneously is impossible. For example, increasing speed often requires trade-offs in centralization or resource intensity (as seen with PoW).

The analysis of decentralized marketplace examples – Golem, Akash, and iExec – helped clarify the practical requirements for a computing resource exchange system. These projects demonstrate how issues of trust, incentivizing compute providers (via tokens), and dispute resolution are addressed. Notably, Nardini et al. (2020) developed protocols to ensure fair interactions between parties in a decentralized computing exchange, leveraging blockchain and smart contracts. These developments illustrate both the strengths (decentralized trading of computation without intermediaries) and risks (the need to ensure computation reliability and prevent fraud) of such systems.

The collected data and conclusions enabled a reasoned selection of the technological foundation for the proposed solution, taking into account the strengths and weaknesses of each platform. For example, if the priority is high throughput and low latency among relatively trusted participants, one should consider private DLTs (like Fabric) or systems with BFT consensus. If full openness and decentralization are required, public networks (Ethereum/Polkadot) can be used, with scalability improved through sharding or Layer-2 solutions. DAG ideas (IOTA) suggest possible future architectures with complete transaction parallelism, while PoH/Solana offers mechanisms for rapid validation.

By avoiding known bottlenecks (e.g., coordinator dependence in IOTA or the high costs of PoW), we combine the strengths of predecessors. Thus, the comprehensive analysis provided a scientifically grounded strategy for selecting and configuring the marketplace architecture, preventing the repetition of past mistakes and facilitating the achievement of set goals.

Bibliography

1. Nardini M., Helmer S., El Ioini N., Pahl C. A Blockchain-based Decentralized Electronic Marketplace for Computing Resources. SN Computer Science, 2020, 1:251. DOI: 10.1007/s42979-020-00243-7.

2. Akash Network. Akash Whitepaper: Decentralized Cloud Computing Marketplace. 2023. Available at: https://akash.network/whitepaper.

3. Uriarte R. B., DeNicola R. Blockchain-based decentralized cloud/fog solutions: Challenges, opportunities, and standards. IEEE Communications Standards Magazine, 2018, т. 2, № 3. DOI: 10.1109/MCOMSTD.2018.1800020

4. Mssassi S., Abou El Kalam A. The Blockchain Trilemma: A Formal Proof of the Inherent Trade-Offs among Decentralization, Security, and Scalability. Applied Sciences, 2025, 15(1):19. DOI: 10.3390/app15010019

5. Vujičić D., Jagodić D., Ranđić S. Blockchain technology, bitcoin, and Ethereum: A brief overview. 21–23 March 2018. DOI: 10.1109/INFOTEH.2018.8345547

6. Song W., Lu D., Zhu M., Zhu C., Zhao J., Sun Y., Li L.. Blockchain Bottleneck Analysis Based on Performance Metrics Causality. Electronics, 2024, 13(21):4236. DOI: 10.3390/electronics13214236

7. Croman K., Decker C., Eyal I., Efe Gencer A., Juels A., Kosba A., Miller A., Saxena P., Shi E., Gün Sirer E., Song D., Wattenhofer R. On Scaling Decentralized Blockchains. In: Financial Cryptography and Data Security, LNCS 9604, Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-3-662-53357-4_9

8. Khan M. M., Khan F. S., Nadeem M., Khan T. H., Haider S., Daas D. Scalability and Efficiency Analysis of Hyperledger Fabric and Private Ethereum in Smart Contract Execution. Computers, 2025. DOI: 10.3390/computers14040132

9. Kahmann F., Honecker F., Dreyer J., Fisher M., Tönjes R. Performance Comparison of Directed Acyclic Graph-Based Distributed Ledgers and Blockchain Platforms. Computers, 2023, 12(12):257. DOI: 10.3390/computers12120257

10. Fan C., Ghaemi S., Khazaei H., Chen Y, Musilek P. Performance Analysis of the IOTA DAG-based Distributed Ledger. 2021. DOI: 10.7939/r3-w1c1-wt05

11. Fan C., Ghaemi S., Khazaei H., Musilek P. Performance Analysis of the IOTA Tangle. IEEE Access, 2021, 9, с. 37290–37301. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3063040

12. Abbas H. Analysis of Polkadot: Architecture, Internals, and Contradictions. Proc. IEEE Int. Conf. on Blockchain, 2022. DOI: 10.1109/Blockchain55522.2022.00019

13. Yakovenko A. Solana: A New Architecture for a High-Performance Blockchain. White Paper, 2018. Available at: https://solana.com/solana-whitepaper.pdf

14. Chakravorti S., Zhang Z., Yelamarthi K. Comparative Study of Blockchain Performance Metrics: Analyzing Transaction Speed, Scalability, and Energy Efficiency. Journal of Network and Computer Applications, 2023, 212, 103570. DOI: 10.1016/j.jnca.2023.103570

15. Zheng Z., Xie S., Dai H., Chen X., Wang H. An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends. Proc. IEEE Big Data Congress, 2017. DOI: 10.1109/BigDataCongress.2017.85

References

1. Nardini, M., et al. (2020). A Blockchain-based Decentralized Electronic Marketplace for Computing Resources. SN Computer Science 1:251. DOI: 10.1007/s42979-020-00243-7

2. Akash Network. (2023). Akash Whitepaper: Decentralized Cloud Computing Marketplace. Available at: https://akash.network/whitepaper

3. Uriarte R. B., DeNicola R. Blockchain-based decentralized cloud/fog solutions: Challenges, opportunities, and standards // IEEE Communications Standards Magazine. – 2018. – Т. 2. – №. 3.

4. Mssassi, S., et al. (2025). The Blockchain Trilemma: A Formal Proof of the Inherent Trade-Offs among Decentralization, Security, and Scalability. Applied Sciences, 15(1):19. DOI: 10.3390/app15010019

5. Dejan Vujičić, Dijana Jagodić, Siniša Ranđić. Blockchain technology, bitcoin, and Ethereum: A brief overview. 21–23 March 2018. DOI: 10.1109/INFOTEH.2018.8345547

6. Song, W., et al. (2024). Blockchain Bottleneck Analysis Based on Performance Metrics Causality. Electronics, 13(21):4236. DOI: 10.3390/electronics13214236

7. Croman, K., et al. (2016). On Scaling Decentralized Blockchains. In: Financial Cryptography and Data Security, LNCS 9604. Springer. DOI: 10.1007/978-3-662-53357-4_9

8. Khan, M. M., et al. (2025). Scalability and Efficiency Analysis of Hyperledger Fabric and Private Ethereum in Smart Contract Execution. Computers. DOI: 10.3390/computers14040132

9. Kahmann, F., et al. (2023). Performance Comparison of Directed Acyclic Graph-Based Distributed Ledgers and Blockchain Platforms. Computers 12(12):257. DOI: 10.3390/computers12120257

10. Fan, C., et al. (2021). Performance Analysis of the IOTA DAG-based Distributed Ledger. DOI: 10.7939/r3-w1c1-wt05

11. Fan, C., Ghaemi, S., Khazaei, H., Musilek, P. (2021). Performance Analysis of the IOTA Tangle. *IEEE Access*, 9, 37290–37301. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3063040

12. Abbas, H., et al. (2022). Analysis of Polkadot: Architecture, Internals, and Contradictions. Proc. IEEE Int. Conf. on Blockchain. DOI: 10.1109/Blockchain55522.2022.00019

13 Yakovenko, A. (2018). Solana: A New Architecture for a High-Performance Blockchain. *White Paper*. Available at: https://solana.com/solana-whitepaper.pdf

14. Chakravorti, S., Zhang, Z., Yelamarthi, K. (2023). Comparative Study of Blockchain Performance Metrics: Analyzing Transaction Speed, Scalability, and Energy Efficiency. Journal of Network and Computer Applications, 212, 103570. DOI: 10.1016/j.jnca.2023.103570

15. Zheng, Z., et al. (2017). An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends. Proc. IEEE Big Data Congress. DOI: 10.1109/BigDataCongress.2017.85

УДК 616.834-085:612.82-073.97 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.4

Д. С. БІЩАК
аспірант, асистент кафедри програмного забезпечення
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
ORCID: 0009-0005-9993-9302

М. Р. ПЕТРИК
доктор фізико-математичних наук,
професор кафедри програмної інженерії
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
ORCID: 0000-0001-6612-7213

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕДИКАМЕНТОЗНОГО ЛІКУВАННЯ ТРЕМОРУ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ΔR ТА ЕЕГ

Ефективність лікування тремору при хворобі Паркінсона та інших нейродегенеративних розладах потребує об'єктивної оцінки, оскільки візуальна шкальна оцінка є надто суб'єктивною. Розробка комплексного підходу, що поєднує аналіз параметрів руху та нейрофізіологічних показників, підвищує точність моніторингу терапевтичної відповіді та персоналізації лікування. ***Мета дослідження*** *– об'єктивно оцінити ефективність фармакотерапії тремору в пацієнтів із хворобою Паркінсона та іншими нейродегенеративними розладами шляхом комплексного аналізу параметрів графомоторної активності (ΔR) та електроенцефалографічних (ЕЕГ) патернів.* ***Матеріали і методи.*** *Здійснено системний аналіз наукової літератури та узагальнення сучасних методологічних підходів до оцінки тремору при хворобі Паркінсона та інших нейродегенеративних розладах. Розглянуто теоретичні основи й практичне застосування показника ΔR (відхилення від ідеальної траєкторії) при спіралеграфічних тестах та методи аналізу ЕЕГ з акцентом на оцінку міжканальної синхронізації та когерентності сигналів. Проаналізовано перспективи інтеграції цих методів для об'єктивної оцінки ефективності дофамінергічних препаратів.* ***Результати.*** *Показник ΔR при виконанні спіралеграфічних тестів – чутливий інструмент кількісної оцінки тремору щодо об'єктивної фіксації змін під впливом фармакотерапії. ЕЕГ-аналіз дав змогу виявити характерні для хвороби Паркінсона та інших нейродегенеративних розладів патерни синхронізації нейрональної активності, зокрема підвищену когерентність у бета-діапазоні (13–30 Гц) між моторною корою та фронтальними ділянками мозку. Застосування дофамінергічних препаратів зумовлює зниження цієї патологічної синхронізації з характерним часовим лагом 200–300 мс між змінами ЕЕГ-патернів та зменшенням тремору. Феномен міжканальної синхронізації виступає потенційним біомаркером для диференційної діагностики різних форм паркінсонізму та моніторингу ефективності лікування.* ***Висновки.*** *Інтегрований аналіз ΔR та патернів ЕЕГ-сигналів забезпечує об'єктивний інструментарій для оцінки ефективності фармакотерапії тремору при хворобі Паркінсона та інших нейродегенеративних розладах. Такий часовий збіг вказує на ймовірний причинно-наслідковий зв'язок між нормалізацією функціональної активності мозку та покращенням моторної функції. Комплексний підхід має значний потенціал для впровадження в клінічну практику з метою персоналізації терапевтичних стратегій.*

Ключові слова: *хвороба Паркінсона, нейродегенеративні розлади, тремор, електроенцефалографія (ЕЕГ), показник ΔR, десинхронізація, міжканальна синхронізація, дофамінергічна терапія, об'єктивна оцінка, нейрофізіологічний біомаркер.*

D. S. BISHCHAK
Postgraduate Student, Assistant at the Department of Software Engineering
Ivan Puluj Ternopil National Technical University
ORCID: 0009-0005-9993-9302

M. R. PETRYK
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor at the Department of Software Engineering
Ivan Puluj Ternopil National Technical University
ORCID: 0000-0001-6612-7213

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF MEDICATION FOR TREMOR BASED ON ΔR AND EEG ANALYSIS

Effectiveness of tremor treatment in Parkinson's disease and other tremor-related neurological disorders requires objective assessment, as visual scale evaluation is overly subjective. Development of a comprehensive approach combining analysis of movement parameters and neurophysiological indicators enhances the accuracy of therapeutic

response monitoring and treatment personalization. ***Study objective*** *– to objectively evaluate the effectiveness of tremor pharmacotherapy in patients with Parkinson's disease and other tremor-related neurological disorders through comprehensive analysis of graphomotor activity parameters (ΔR) and electroencephalographic (EEG) patterns.* ***Materials and methods.*** *A systematic analysis of scientific literature and synthesis of current methodological approaches to tremor assessment in Parkinson's disease and other tremor-related neurological disorders was conducted. The theoretical foundations and practical application of the ΔR indicator (deviation from ideal trajectory) in spirographic tests and EEG analysis methods were examined, with emphasis on assessment of inter-channel synchronization and signal coherence. The prospects for integrating these methods for objective evaluation of dopaminergic drug effectiveness were analyzed.* ***Results.*** *The ΔR indicator during spirographic test performance represents a sensitive tool for quantitative tremor assessment regarding objective documentation of changes under pharmacotherapy influence. EEG analysis enabled identification of neuronal activity synchronization patterns characteristic of Parkinson's disease and other tremor-related neurological disorders, particularly increased coherence in the beta range (13–30 Hz) between motor cortex and frontal brain regions. Application of dopaminergic drugs results in reduction of this pathological synchronization with a characteristic time lag of 200–300 ms between EEG pattern changes and tremor reduction. The inter-channel synchronization phenomenon serves as a potential biomarker for differential diagnosis of various forms of parkinsonism and treatment effectiveness monitoring.* ***Conclusions.*** *Integrated analysis of ΔR and EEG signal patterns provides objective instrumentation for evaluating tremor pharmacotherapy effectiveness in Parkinson's disease and other tremor-related neurological disorders. Such temporal coincidence indicates a probable causal relationship between brain functional activity normalization and motor function improvement. The comprehensive approach has significant potential for clinical practice implementation to personalize therapeutic strategies.*

Key words: *Parkinson's disease, tremor-related neurological disorders, tremor, electroencephalography (EEG), ΔR index, desynchronization, interchannel synchronization, dopaminergic therapy, objective assessment, neurophysiological biomarker.*

Постановка проблеми

Хвороба Паркінсона (ХП) за показником поширеності посідає друге місце серед нейродегенеративних захворювань, поступаючись лише хворобі Альцгеймера, і характеризується поступовою втратою дофамінергічних нейронів чорної субстанції. За даними епідеміологічних досліджень, майже 1 % населення віком від 60 років страждає на ХП та інші нейродегенеративні розлади. Демографічні тенденції свідчать про значне зростання кількості хворих на цю хворобу найближчими десятиліттями [1–4].

Одним із кардинальних моторних симптомів ХП та інших нейродегенеративних розладів, що істотно погіршує функціональні можливості пацієнтів і негативно впливає на якість їхнього життя є тремор спокою з частотою 4–6 Гц. Сучасні підходи до фармакотерапії ХП, зокрема застосування леводопи та агоністів дофамінових рецепторів, сприяють значному покращенню стану пацієнтів, проте залишається проблема об'єктивної оцінки ефективності лікувальних інтервенцій. У клінічній практиці оцінка ефективності антипаркінсонічної терапії традиційно ґрунтується на суб'єктивних шкалах, таких як Уніфікована шкала оцінки ХП (UPDRS), що обмежує можливості точного моніторингу прогресування захворювання та оптимізації персоналізованого лікування [5–10].

Особливо актуальним для хворих на ХП та інші нейродегенеративні розлади є аспекти об'єктивної оцінки ефективності лікування тремору, оскільки цей симптом має значну варіабельність і може змінюватися під впливом різних чинників, особливо емоційного стану пацієнта та рівня його фізичного навантаження [11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останнім часом зростає інтерес до комбінованого застосування кінематичних та електрофізіологічних методів у дослідженні тремору. Специфічні патерни синхронізації нейронної активності в моторних контурах пацієнтів із ХП, зокрема надмірна синхронізація в бета-діапазоні (13–30 Гц) між моторною корою та глибинними структурами мозку зменшуються після приймання дофамінергічних препаратів, що супроводжується клінічним покращенням моторних симптомів [12].

Досить важливим щодо можливості прогнозування епізодів тремору на основі аналізу ЕЕГ-сигналів у пацієнтів з ХП та іншими нейродегенеративними розладами є вивчення стійкого зв'язку між змінами електричної активності мозку та проявами тремору, що можливе завдяки застосуванню алгоритму, який дає змогу точно виявляти характерні патерни ЕЕГ-активності, що передують виникненню тремору. Крім того, на основі розробленої методики аналізу спіралеграфічних тестів для оцінки тремору при нейродегенеративних захворюваннях проводиться диференціювання різних типів тремору та оцінка їхніх змін під впливом лікування [13, 14].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. На сьогодні недостатньо вивчено часовий взаємозв'язок між змінами в ЕЕГ-патернах та кінематичними параметрами тремору під впливом дофамінергічних препаратів. Дослідження наявності часового зсуву між змінами центральної нейрональної активності та периферичними проявами тремору є перспективними щодо причинно-наслідкових зв'язків патофізіологічних аспектів тремору та механізму дії протипаркінсонічних препаратів.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є об'єктивізація оцінки ефективності фармакотерапії тремору в пацієнтів із хворобою Паркінсона та іншими нейродегенеративними розладами шляхом комплексного аналізу параметрів графомоторної активності (Δ*R*) та електроенцефалографічних (ЕЕГ) патернів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Методологічні основи оцінки тремору з використанням показника Δ*R* та ЕЕГ. Кількісна оцінка тремору з використанням показника Δ*R* ґрунтується на аналізі відхилень фактичної траєкторії руху від ідеальної при виконанні стандартизованих графомоторних завдань. Найчастіше для цього використовують спіралеграфічний тест – малювання спіралі Архімеда від центру назовні, який є одним із найчутливіших та найбільш інформативних для кількісної оцінки тремору, оскільки пов'язаний зі складною координацією рухів у двох площинах і дає змогу виявити навіть субклінічні прояви тремору [15].

У клінічній практиці реєстрація графомоторної активності здійснюється за допомогою графічного планшета (наприклад, Huon KAMVAS Pro 16 graphics). Він має високу частоту опитування (250 Гц) та точність реєстрації позиції стилуса (±0,25 мм). Планшет під'єднується до комп'ютера зі спеціалізованим програмним забезпеченням, що дає змогу фіксувати координати точок траєкторії (*x*, *y*), час досягнення кожної точки та тиск стилуса на планшет [16].

Алгоритм обчислення ΔR охоплює такі етапи: визначення ідеальної спіралі Архімеда на основі початкової та кінцевої точок руху; перетворення фактичної траєкторії в полярну систему координат відносно центральної точки спіралі; обчислення відхилення фактичної траєкторії від ідеальної для кожної точки реєстрації

$$(\Delta R(i) = |R_{факт}(i) - R_{ідеал}(\text{i})|,$$

де $R_{факт}(i)$ – відстань від центра до фактичної точки i, $R_{ідеал}(i)$ – відстань від центра до відповідної точки на ідеальній спіралі) та обчислення середньоквадратичного відхилення Δ*R* на всій траєкторії

$$\Delta R = \sqrt{\left(\sum (R_{факт}(i) - R_{ідеал}(i))^2 / N\right)},$$

де N – кількість точок вимірювання) [17].

Для аналізу частотних характеристик тремору проводиться спектральна декомпозиція сигналу ΔR із використанням швидкого перетворення Фур'є (FFT), що дає змогу визначити найбільш виражену частоту тремору, його амплітуду та регулярність. Паркінсонічний тремор характеризується переважною частотою в діапазоні 4–6 Гц та високою регулярністю, що відрізняє його від інших типів тремору [18].

Електроенцефалографія (ЕЕГ) – це неінвазивний метод дослідження функціональної активності мозку з високою часовою роздільною здатністю. При дослідженні тремору в пацієнтів із ХП аналіз ЕЕГ спрямований на вивчення патернів синхронізації чи десинхронізації нейрональної активності та змін у функціональному зв'язку мозкових структур. ЕЕГ записують за міжнародною системою 10–20 із використанням стандартизованих систем електродів. Для детального аналізу моторних функцій особливо важливими є центральні (C3, C4, Cz) та фронтальні (F3, F4, Fz) відведення, розташовані над моторною корою та премоторними ділянками. Обробка та аналіз ЕЕГ-сигналів містить попередню фільтрацію для видалення артефактів та спектральний аналіз із поділом на стандартні частотні діапазони: дельта (0,5–4 Гц), тета (4–8 Гц), альфа (8–13 Гц), низький бета (13–20 Гц), високий бета (20–30 Гц) та гамма (30–40 Гц). Для оцінки функціонального зв'язку між різними ділянками мозку має бути обчислена когерентність сигналів за формулою:

$$Coh(f) = |S_{xy}(f)|^2/(S_{xx}(f) \cdot S_{yy}(f)),$$

де $S_{xy}(f)$ – кросспектральна щільність потужності сигналів x та y на частоті f, $S_{xx}(f)$ та $S_{yy}(f)$ – спектральні щільності потужності сигналів x та y відповідно. Особливо інформативною при ХП є оцінка когерентності в бета-діапазоні (13–30 Гц) між моторною корою та фронтальними ділянками головного мозку, що відображає функціональний зв'язок між корою та базальними гангліями. Підвищена когерентність у цьому діапазоні є характерною ознакою ХП та інших нейродегенеративних розладів і корелює з виразністю тремору [19–22].

Для кількісної оцінки загального рівня синхронізації активності різних мозкових ділянок застосовується індекс глобальної когерентності (ІГК) – середнє значення когерентності між усіма парами електродів у заданому частотному діапазоні, підвищення рівня якого свідчить про патологічну синхронізацію нейрональної активності, що характерна для ХП та інших нейродегенеративних розладів [23].

Інтеграція аналізу ΔR та ЕЕГ для комплексної оцінки тремору потребує синхронізованої реєстрації графомоторної активності та електроенцефалограми. Для цього використовуються спеціальні програмні модулі, що забезпечують точну часову синхронізацію між двома системами реєстрації. Для дослідження взаємозв'язку між графомоторною активністю та ЕЕГ-сигналами застосовується метод кроскореляції:

$$CCF(\tau) = \sum[\Delta R(t) \cdot EEG(t+\tau)] \Big/ \sqrt{\left(\sum \Delta R^2(t) \cdot \sum EEG^2(t+\tau)\right)},$$

де τ – часовий зсув між сигналами. Кроскореляційний аналіз дає змогу визначити силу взаємозв'язку між змінами Δ*R* та ЕЕГ-патернами, а також часовий зсув, при якому цей взаємозв'язок є максимальним. Наявність стабільного часового зсуву, де зміни в ЕЕГ передують змінам у Δ*R*, вказує на причинно-наслідковий зв'язок між нейрофізіологічними процесами та проявами тремору [24, 25].

Інтегрований аналіз Δ*R* та ЕЕГ є основою для розробки комплексного діагностичного інструменту, що дає можливість не лише оцінювати ефективність лікування, але й диференціювати ХП з іншими тремор-асоційованими захворюваннями на ранніх стадіях хвороби [26].

Дофамінергічні препарати, зокрема леводопа, агоністи дофамінових рецепторів, мають значний вплив на параметри тремору, що відображається в змінах показника Δ*R*. За даними літератури, після приймання дофамінергічних препаратів у більшості пацієнтів із ХП та іншими нейродегенеративними розладами спостерігається статистично значуще зменшення ΔR, що свідчить про зниження інтенсивності тремору [27, 28].

У табл. 1 наведено узагальнення типових змін показників Δ*R* та ЕЕГ під впливом дофамінергічних препаратів, що спостерігаються при різних фенотипах ХП та інших нейродегенеративних розладів.

Таблиця 1

Типові зміни показників ΔR та ЕЕГ до та після приймання дофамінергічних препаратів при різних фенотипах ХП

Показник	Тремор-домінантний фенотип		Акінетико-ригідний фенотип		Змішаний фенотип	
	До лікування	Після лікування	До лікування	Після лікування	До лікування	Після лікування
Δ*R*, мм	Значне підвищення	Істотне зниження*	Помірне підвищення	Помірне зниження	Підвищення	Виражене зниження
Переважна частота тремору, Гц	4–5	Зсув до вищих частот	5–6	Незначні зміни	4–6	Зсув до вищих частот
Індекс регулярності тремору	Високий	Значне зниження*	Середній	Незначне зниження	Високий	Помірне зниження
Когерентність C3–F3 (бета)	Значно підвищена	Істотне зниження*	Помірно підвищена	Помірне зниження	Підвищена	Виражене зниження
Індекс глобальної когерентності	Високий	Значне зниження*	Помірно підвищений	Помірне зниження	Підвищений	Виражене зниження

* *найбільш виражені зміни серед фенотипів*

Ефект дофамінергічних препаратів на Δ*R* значно відрізняється в пацієнтів із різними фенотипами ХП та інших нейродегенеративних розладів. Найбільш вираженим є зниження Δ*R* у пацієнтів із тремор-домінантним фенотипом, тоді як у пацієнтів з акінетико-ригідним фенотипом зміни ΔR є менш значними [29].

Крім змін в амплітуді тремору, дофамінергічні препарати впливають на його частотні характеристики, що визначається в зміщенні переважної частоти тремору до вищих значень (з 4–5 Гц до 5–6 Гц) та зниженні індексу регулярності тремору [30, 31].

Аналіз ЕЕГ спрямований на виявлення специфічних змін у патернах функціонального зв'язку мозкових структур після приймання дофамінергічних препаратів – у пацієнтів із ХП та іншими нейродегенеративними розладами спостерігається підвищена синхронізація сигналів, особливо в бета-діапазоні (13–30 Гц), між моторною корою та фронтальними ділянками головного мозку [32].

Застосування дофамінергічних препаратів значно знижує когерентність у бета-діапазоні, що відображає десинхронізацію нейрональної активності та відновлення функціонального розділення мозкових мереж. Таке зниження когерентності є найбільш вираженим у низькому бета-діапазоні (13–20 Гц), що найтісніше пов'язаний із патофізіологією ХП та інших нейродегенеративних розладів. Результати топографічного аналізу свідчать, що до лікування підвищена когерентність у бета-діапазоні має характерний просторовий патерн із максимумом у центрально-фронтальних відведеннях, особливо контралатерального до найбільш вираженого тремору. Дофамінергічні препарати зменшують вираженість когерентності в бета-діапазоні, наближаючи її до аналогічного показника в здорових осіб [33, 34].

Особливо інформативним є феномен «міжканальної синхронізації» – патологічне підвищення загальної когерентності між усіма ЕЕГ-відведеннями, що спостерігається в пацієнтів із ХП та іншими нейродегенеративними розладами. Індекс глобальної когерентності в бета-діапазоні в пацієнтів із ХП значно перевищує цей показник у здорових осіб. Після приймання дофамінергічних препаратів ІГК знижується, що свідчить про зменшення патологічної синхронізації нейрональної активності [35].

Важливим аспектом комплексного аналізу ефективності дофамінергічних препаратів є вивчення взаємозв'язку між змінами графомоторних параметрів (Δ*R*) та патернами ЕЕГ. Деякі дослідження демонструють наявність сильного позитивного зв'язку між скороченням Δ*R* та зниженням когерентності в бета-діапазоні між моторними та фронтальними ділянками кори головного мозку. Особливо важливим є часовий аналіз цього взаємозв'язку. Кроскореляційний аналіз виявляє, що максимальний рівень кореляції між зниженням бета-когерентності та

зменшенням Δ*R* спостерігається при часовому зсуві 200–300 мс, причому зміни в ЕЕГ-патернах передують змінам у параметрах тремору. Він відповідає даним про проведення сигналів від базальних гангліїв через таламус до моторної кори та далі до периферичних ефекторів [36, 37].

Сила взаємозв'язку між змінами Δ*R* та ЕЕГ-патернами залежить від клінічних характеристик пацієнтів. У пацієнтів із тремор-домінантним фенотипом ХП кореляція між зниженням бета-когерентності та зменшенням ΔR є найсильнішою, тоді як у пацієнтів з акінетико-ригідним фенотипом вона є помірною. Це може відображати різні патофізіологічні механізми моторних симптомів у цих підгрупах пацієнтів [38, 39].

Окрему увагу варто приділити випадкам атипової реакції на дофамінергічну терапію, коли не спостерігається значущого зменшення Δ*R* та відповідної десинхронізації ЕЕГ-сигналів. Такі випадки часто асоціюються з атиповими формами паркінсонізму (множинна системна атрофія, поступальний над'ядерний параліч, кортикобазальна дегенерація), що має важливе значення для диференційної діагностики [40].

Перспективи клінічного застосування комплексного аналізу Δ*R* та ЕЕГ. Комплексний аналіз Δ*R* та ЕЕГ має значні переваги над традиційною візуальною оцінкою та клінічними шкалами для об'єктивізації оцінки ефективності лікування тремору при ХП та інших нейродегенеративних розладах. По-перше, цей підхід забезпечує кількісні, об'єктивні та відтворювані вимірювання, що мінімізують вплив суб'єктивного чинника та міжекспертної варіативності. Згідно з даними попередніх досліджень, коефіцієнт міжекспертної згоди для оцінки тремору за клінічними шкалами є недостатньо високим, тоді як відтворюваність вимірювань ΔR між різними тестуваннями є істотно вищою. По-друге, метод має високу чутливість до незначних змін у стані пацієнта, що дає змогу фіксувати терапевтичний ефект навіть у випадках, коли він не досягає порогу клінічної значущості за традиційними шкалами. Мінімальна детектована зміна для ΔR складає близько 5 % від вихідного значення, тоді як для клінічних шкал цей показник значно вищий. По-третє, комплексний підхід дає змогу не лише фіксувати зовнішні прояви покращення (зменшення тремору), але й відповідні нейрофізіологічні зміни, що лежать в основі терапевтичного ефекту. Це забезпечує глибше розуміння механізмів дії препаратів та може допомогти у виявленні пацієнтів з атиповою реакцією на лікування.

Аналіз взаємозв'язку між змінами Δ*R* та ЕЕГ-патернами має потенціал для диференційної діагностики різних форм паркінсонізму на ранніх стадіях захворювання. Специфічні патерни взаємозв'язку між графомоторними параметрами та ЕЕГ-характеристиками можуть слугувати біомаркерами для диференціації ідіопатичної ХП та інших нейродегенеративних розладів від атипових форм паркінсонізму. Відсутність адекватної десинхронізації ЕЕГ-сигналів після приймання дофамінергічних препаратів у поєднанні з незначним зменшенням Δ*R* може бути раннім маркером атипового паркінсонізму, що сприяє своєчасному корегуванню терапевтичної стратегії.

Комплексний аналіз вихідних параметрів Δ*R* та ЕЕГ також має потенціал для прогнозування ефективності дофамінергічної терапії. Дослідження показують, що певні патерни функціональної зв'язності мозку у вихідному стані можуть бути предикторами позитивної реакції на лікування. Зокрема, підвищена когерентність у низькому бета-діапазоні (13–20 Гц) асоціюється з кращою відповіддю на дофамінергічну терапію. Упровадження комплексного аналізу ΔR та ЕЕГ у клінічну практику має потенціал для персоналізації терапевтичних підходів при ХП. Виявлені відмінності у взаємозв'язку між змінами Δ*R* та ЕЕГ-патернами в пацієнтів із різними фенотипами ХП та інших нейродегенеративних розладів можуть бути використані для вибору оптимальної фармакотерапії.

Об'єктивний моніторинг змін Δ*R* та ЕЕГ-когерентності при різних дозах дофамінергічних препаратів є визначальним щодо індивідуального «терапевтичного вікна», що забезпечує оптимальний баланс між терапевтичним ефектом та побічними діями. Вивчення індивідуальних особливостей взаємозв'язку між нейрофізіологічними змінами та клінічним покращенням спрямоване на розробку стратегії персоналізованого лікування, що передбачає не лише фармакотерапію, але й нейромодуляцію (наприклад, транскраніальну магнітну стимуляцію чи транскраніальну стимуляцію постійним струмом [41–46].

Висновки

1. Комплексний аналіз параметрів графомоторної активності (Δ*R*) та ЕЕГ патернів значно розширює діагностичні можливості при оцінці результативності лікувальних втручань у пацієнтів із тремором при хворобі Паркінсона та інших нейродегенеративних розладах.
2. Застосування метрики Δ*R* як кількісного параметра відхилення від розрахункової траєкторії при спіралеграфічному тестуванні демонструє належний рівень відтворюваності результатів між різними дослідженнями.
3. Електроенцефалографічне дослідження виявляє специфічні ознаки надмірної синхронізації нервових структур мозку при хворобі Паркінсона та інших нейродегенеративних розладах, зокрема підвищені показники когерентності в діапазоні бета-частот між моторною зоною кори та лобними ділянками.
4. Часовий зв'язок між змінами ЕЕГ-патернів та кінематичних показників тремору є особливо значущим щодо уявлення патофізіологічних механізмів хвороби Паркінсона та інших нейродегенеративних розладів.
5. Упровадження цього методу комплексного аналізу Δ*R* та ЕЕГ у щоденну лікарську практику дає змогу істотно покращити об'єктивність діагностичних рішень при оцінці ефективності терапії, розмежуванні різних форм паркінсонізму та персоналізованому лікуванні.

Список використаної літератури

1. Чиняк О., Дубенко О., Потапов О., Шульга А., Коцюба А. Хвороба Паркінсона та інших нейродегенеративних розладах – огляд сучасних методів лікування. *EUMJ*. 2023. Т. 11, № 1. С. 1–13. DOI: https://doi.org/10.21272/eumj.2023;11(1):1-13

2. Ben-Shlomo Y., Darweesh S., Llibre-Guerra J., Marras C., San Luciano M., Tanner C. The epidemiology of Parkinson's disease. *The Lancet*. 2024. Vol. 403, No. 10423. P. 283–292. DOI: https://doi.org/10.1016/S0140-6736(23)01419-8

3. Simon D. K., Tanner C. M., Brundin P. Parkinson disease epidemiology, pathology, genetics, and pathophysiology. *Clinics in geriatric medicine*. 2020. Vol. 36, No. 1. P. 1-12. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cger.2019.08.002

4. Patil R. R. Epidemiology of Parkinson's disease–current understanding of causation and risk factors. *Techniques for Assessment of Parkinsonism for Diagnosis and Rehabilitation*. Singapore : Springer Singapore, 2021. P. 31–48. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-3056-9_3

5. Карабань І., Карасевич Н. Сучасні аспекти діагностики й медикаментозної терапії хвороби Паркінсона та інших нейродегенеративних розладах. *Журнал Неврології ім. Б. М. Маньковського*. 2020. Т. 8, № 3–4. С. 63–72. https://neuroscience.com.ua/index.php/ journal/article/view/362

6. Федотова М. С., Панфілова Г. Л. Аналіз сучасних підходів до проведення фармакотерапії деменції, в тому числі хвороби Альцгеймера. Харків, 2021. 26 с. https://dspace.nuph.edu.ua/bitstream/123456789/27418/1/141.pdf

7. Токар А. С. Клініко-фармакологічні аспекти застосування протипаркінсонічних препаратів. Харків, 2025. 17 с. https://dspace.nuph.edu.ua/ bitstream/123456789/ 34404/1/ТОКАР%20Аліна%2012.02.2025.pdf

8. Zeuner K. E., Schäffer E., Hopfner F., Brüggemann N., Berg D. Progress of pharmacological approaches in Parkinson's disease. Clinical Pharmacology & Therapeutics. 2019. Vol. 105, No. 5. P. 1106–1120. DOI: https://doi.org/10.1002/ cpt.1374

9. Брушко В., Ковельська А., Баннікова Р. Аналіз наявних інструментів оцінювання впливу фізичної терапії на осіб з хворобою Паркінсона та інших нейродегенеративних розладах. Київ, 2021. 22 с. https://reposit.uni-sport.edu.ua/items/4c860fa4-fb61-486b-b411-f316513dbb30

10. Hamzehei S., Akbarzadeh O., Attar H., Rezaee K., Fasihihour N., Khosravi M. R. Predicting the total Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS) based on ML techniques and cloud-based update. Journal of Cloud Computing. 2023. Vol. 12, No. 1. P. 12. DOI: https://doi.org/10.1186/s13677-022-00388-1

11. Петрик М., Біщак Д., Бачинський М., Бревус В., Чиж В., Михалик Д. Аналіз мимовільних рухів пацієнтів із симптомами тремору під впливом когнітивних впливів. Прикладні питання математичного моделювання. 2024. Т. 7, № 2. С. 150–165. DOI: https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2024-7-2-14

12. Осійчук І. В. Розробка інформаційної системи для діагностування тремору з використанням графічного планшету : кваліфікаційна робота магістра. Тернопіль, 2024. 103 с.http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44858

13. Farashi S., Sarihi A., Ramezani M., Kashani H. Parkinson's disease tremor prediction using EEG data analysis – A preliminary and feasibility study. *BMC Neurology*. 2023. Vol. 23, No. 1. P. 420. DOI: https://doi.org/10.1186/s12883-023-03468-0

14. Мудрик І. Я. Автоматизовані системи діагностування стану пацієнтів, хворих на есенціальний тремор : автореф. дис. ... д-ра філософії. Київ, 2021. 16 с. http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/35810

15. Аравіцька Д. Н. Оптимізація комплексного лікування хворих на хворобу Паркінсона та інших нейродегенеративних розладах II стадії з використанням транскраніальної магнітної стимуляції головного мозку. Diss. Запорізький державний медико-фармацевтичний університет, 2024. http://dspace.zsmu.edu.ua/handle/ 123456789/20444

16. Deuschl G., Becktepe J. S., Dirkx M., Haubenberger D., Hassan A., Helmich R. C., Elble R. J. The clinical and electrophysiological investigation of tremor. Clinical Neurophysiology. 2022. Vol. 136. P. 93–129. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clinph. 2022.01.004

17. Fratello M., Crisci D., Mazzeo P. L., De Marinis S., Speranza D., De Natale C., Esposito A. Classification-based screening of Parkinson's disease patients through graph and handwriting signals. Engineering Proceedings. 2021. Vol. 11, No. 1. P. 49. DOI: https://doi.org/10.3390/ASEC2021-11128

18. Wilkins K. B., Petrucci M. N., Kim J. W., Goldfinger M. H., Kehnemouyi Y. M., Bronte-Stewart H. M. Quantitative digitography measures motor symptoms and disease progression in Parkinson's disease. Journal of Parkinson's Disease. 2022. Vol. 12, No. 6. P. 1979–1990. DOI: https://doi.org/10.3233/JPD-223264

19. Shirahige L., Berenguer-Rocha M., Mendonça M., Rocha S., Rodrigues M., Monteiro A., Simis M. Quantitative electroencephalography characteristics for Parkinson's disease: a systematic review. Journal of Parkinson's Disease. 2020. Vol. 10, No. 2. P. 455–470. DOI: https://doi.org/10.3233/JPD-191840

20. Maitín A. M., García-Tejedor A. J., Romero Muñoz J. P. Machine learning approaches for detecting Parkinson's disease from EEG analysis: a systematic review. Applied Sciences. 2020. Vol. 10, No. 23. P. 8662. DOI: https://doi.org/10.3390/app10238662

21. Maitin A. M., Romero Muñoz J. P., García-Tejedor Á. J. Survey of machine learning techniques in the analysis of EEG signals for Parkinson's disease: A systematic review. Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 14. P. 6967. DOI: https://doi.org/10.3390/app12146967

22. Jackson N., Cole S. R., Voytek B., Swann N. C. Characteristics of waveform shape in Parkinson's disease detected with scalp electroencephalography. eNeuro. 2019. Vol. 6, No. 3. P. ENEURO.0151-19.2019. DOI: https://doi.org/10.1523/ENEURO.0151-19.2019

23. Schneider M., Dann B., Sheshadri S., Scherberger H., Vinck M. A general theory of coherence between brain areas. bioRxiv. 2020. P. 2020–06. DOI: https://doi.org/10.1101/2020.06.17.156190

24. Mendoza-Armenta A. A., Palacios-Arellano E. M., Rodríguez-Montes D. A., Franco-Santana R. B., Zalapa-Lúa R. A., Gómez-Velázquez F. R. Implementation of a Real-Time Brain-to-Brain Synchrony Estimation Algorithm for Neuroeducation Applications. Sensors. 2024. Vol. 24, No. 6. P. 1776. DOI: https://doi.org/10.3390/s24061776

25. Zhang Y., Li R., Zhang Q., Wang Y., Song H., Li J. Synchronous analyses between electroencephalogram and surface electromyogram based on motor imagery and motor execution. Review of Scientific Instruments. 2022. Vol. 93, No. 11. P. 116104. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0110827

26. Brambilla C., Pirovano I., Mira R. M., Rizzo G., Scano A., Mastropietro A. Combined use of EMG and EEG techniques for neuromotor assessment in rehabilitative applications: A systematic review. Sensors. 2021. Vol. 21, No. 21. P. 7014. DOI: https://doi.org/10.3390/s21217014

27. Токар А. С. Клініко-фармакологічні аспекти застосування протипаркінсонічних препаратів. Харків, 2025. 19 с. https://dspace.nuph.edu.ua/bitstream/123456789/34404/1/ТОКАР%20Аліна%2012.02.2025.pdf

28. Baizabal-Carvallo J. F., Morgan J. C. Drug-induced tremor, clinical features, diagnostic approach and management. Journal of the neurological sciences. 2022. Vol. 435. P. 120192. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jns.2022.120192

29. Zham P., Kumar D. K., Dabnichki P., Poosapadi Arjunan S., Raghav S. Effect of levodopa on handwriting tasks of different complexity in Parkinson's disease: a kinematic study. Journal of neurology. 2019. Vol. 266. P. 1376–1382. DOI: https://doi.org/10.1007/s00415-019-09268-2

30. Мушта С. А. Аналіз електроміограм методами машинного навчання для виявлення хвороби Паркінсона та інших нейродегенеративних розладах : кваліфікаційна робота бакалавра. Київ, 2022. 69 с. https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/954e8aae-f9a1-4a85-99c7-db3442 f4300a/content

31. Zach H., Dirkx M. F., Roth D., Pasman J. W., Bloem B. R., Helmich R. C. Dopamine-responsive and dopamine-resistant resting tremor in Parkinson disease. Neurology. 2020. Vol. 95, No. 11. P. e1461–e1470. DOI: https://doi.org/10.1212/ WNL.0000000000010316

32. Koren O., Katz R., Gorodetsky C., Porges O., Amiaz R., Dasberg I., Peretz C. Dopaminergic medication reduces interhemispheric hyper-synchronization in Parkinson's disease. Parkinsonism & Related Disorders. 2022. Vol. 97. P. 39–46. DOI: https://doi.org/10.1016/j.parkreldis.2022.02.009

33. Aprigio D., Bazile P., Rocon E., Fraga A. A., da Silva A. S., Velasques B., Orsini M. Dopaminergic drugs alter beta coherence during motor imagery and motor execution in healthy adults. Arquivos de Neuro-Psiquiatria. 2020. Vol. 78, No. 04. P. 199–205. DOI: 10.1590/0004-282X20190186

34. Zhang J., Villringer A., Nikulin V. V. Dopaminergic modulation of local non-oscillatory activity and global-network properties in Parkinson's disease: an EEG study. Frontiers in Aging Neuroscience. 2022. Vol. 14. P. 846017. DOI: https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.846017

35. Pierro A., Calderara S., Abbiati M., Cesari F., Gaiardelli L., Conti F. Accelerating Linear Recurrent Neural Networks for the Edge with Unstructured Sparsity. arXiv preprint. 2025. arXiv:2502.01330. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.01330

36. Bosch T. J., van Ingen S., van Dijk P. T., Costerus S. I., van der Stouwe A. M., Maurits N. M., van Laar T. Functional connectivity in patients with Parkinson's disease and freezing of gait using resting-state EEG and graph theory. Neurorehabilitation and Neural Repair. 2022. Vol. 36, No. 10–11. P. 715–725. DOI: https://doi.org/10.1177/15459683221129282

37. Nani A., Manuello J., Mancuso L., Liloia D., Costa T., Cauda F. The neural correlates of time: a meta-analysis of neuroimaging studies. Journal of cognitive neuroscience. 2019. Vol. 31, No. 12. P. 1796–1826. DOI: https://doi.org/10.1162/ jocn_a_01459

38. Dirkx M. F., Bologna M. The pathophysiology of Parkinson's disease tremor. Journal of the Neurological Sciences. 2022. Vol. 435. P. 120196. DOI: https://doi.org/ 10.1016/j.jns.2022.120196

39. Abusrair A. H., Elsekaily W., Bohlega S. Tremor in Parkinson's disease: from pathophysiology to advanced therapies. Tremor and Other Hyperkinetic Movements. 2022. Vol. 12. P. 29. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9504742/

40. Moretti D. V. Available and future treatments for atypical parkinsonism. A systematic review. CNS Neuroscience & Therapeutics. 2019. Vol. 25, No. 2. P. 159-174. DOI: https://doi.org/10.1111/cns.13068

41. Vecchio F., Miraglia F., Judica E., Cotelli M., Alù F., Rossini P. M. Graph theory on brain cortical sources in Parkinson's disease: the analysis of 'small world'organization from EEG. Sensors. 2021. Vol. 21, No. 21. P. 7266. DOI: https://doi.org/10.3390/s21217266

42. Wang Q., Zhang H., Wen Z. Characterization of EEG data revealing relationships with cognitive and motor symptoms in Parkinson's disease: a systematic review. Frontiers in aging neuroscience. 2020. Vol. 12. P. 587396. DOI: https://doi.org/10.3389/fnagi.2020.587396

43. Бірюк, В. В. Бірюк В. В. Оптимізація діагностики та лікування ранніх стадій хвороби Паркінсона та інших нейродегенеративних розладах : дис.... канд. мед. наук. Запоріжжя, 2022. 215 с.. http://dspace.zsmu.edu.ua/handle/123456789/20461

44. Iskhakova L., Rappel P., Deffains M., Fonar G., Farah N., Marmor O., Bar-Gad I. Modulation of dopamine tone induces frequency shifts in cortico-basal ganglia beta oscillations. Nature communications. 2021. Vol. 12, No. 1. P. 7026. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-021-27375-5

45. Aouraghe I., Khaissidi G., Mrabti M. A literature review of online handwriting analysis to detect Parkinson's disease at an early stage. Multimedia Tools and Applications. 2023. Vol. 82, No. 8. P. 11923–11948. DOI: https://doi.org/10.1007/s11042-022-13759-2

46. Демченко А. В., Аравицька Г. Н., Ревенко А. В. Транскраніальна магнітна стимуляція при лікуванні моторних та немоторних симптомів хвороби Паркінсона та інших нейродегенеративних розладах. Український неврологічний журнал. 2020. № 4. С. 5–10. DOI: https://doi.org/10.30978/UNJ2020-4-5

References

1. Chyniak O., Dubenko O., Potapov O., Shulha A., Kotsiuba A. (2023). Khvoroba Parkinsona – ohliad suchasnykh metodiv likuvannia [Parkinson's disease – an overview of modern treatment methods] [in Ukrainian]. *EUMJ*, 11(1), 1–13. DOI: https://doi.org/10.21272/eumj.2023;11(1):1-13

2. Ben-Shlomo, Y., Darweesh, S., Llibre-Guerra, J., Marras, C., San Luciano, M., & Tanner, C. (2024). The epidemiology of Parkinson's disease. *The Lancet*, 403(10423), 283–292. DOI: https://doi.org/10.1016/S0140-6736(23)01419-8

3. Simon, D. K., Tanner, C. M., & Brundin, P. (2020). Parkinson disease epidemiology, pathology, genetics, and pathophysiology. *Clinics in geriatric medicine*, 36(1), 1–12. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cger.2019.08.002

4. Patil, R. R. (2021). Epidemiology of Parkinson's disease–current understanding of causation and risk factors. In *Techniques for Assessment of Parkinsonism for Diagnosis and Rehabilitation* (pp. 31–48). Singapore: Springer Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-3056-9_3

5. Karaban, I., & Karasevych, N. (2020). Suchasni aspekty diahnostyky y medykamentoznoi terapii khvoroby Parkinsona [Modern aspects of diagnosis and drug therapy of Parkinson's disease] [in Ukrainian]. *Zhurnal Nevrolohii im. B. M. Mankovskoho*, 8(3–4), 63–72. https://neuroscience.com.ua/index.php/journal/article/view/362

6. Fedotova, M. S., & Panfilova, H. L. (2021). *Analiz suchasnykh pidkhodiv do provedennia farmakoterapii dementsii, v tomu chysli khvoroby Altsheimera* [Analysis of modern approaches to pharmacotherapy of dementia, including Alzheimer's disease] [in Ukrainian]. Kharkiv. https://dspace.nuph.edu.ua/bitstream/123456789/27418/1/1 41.pdf

7. Tokar, A. S. (2025). *Kliniko-farmakolohichni aspekty zastosuvannia protyparkinsonichnykh preparativ* [Clinical and pharmacological aspects of antiparkinson drugs use] [in Ukrainian]. Kharkiv. https://dspace.nuph.edu.ua/bitstream/123456789/ 34404/1/ТОКАР%20Аліна%2012.02.2025.pdf

8. Zeuner, K. E., Schäffer, E., Hopfner, F., Brüggemann, N., & Berg, D. (2019). Progress of pharmacological approaches in Parkinson's disease. *Clinical Pharmacology & Therapeutics*, 105(5), 1106–1120. DOI: https://doi.org/10.1002/cpt.1374

9. Brushko, V., Kovelska, A., & Bannikova, R. (2021). *Analiz naiavnykh instrumentiv otsiniuvannia vplyvu fizychnoi terapii na osib z khvoroboiu Parkinsona* [Analysis of available tools for assessing the impact of physical therapy on people with Parkinson's disease] [in Ukrainian]. Kyiv. https://reposit.uni-sport.edu.ua/items/4c860fa4-fb61-486b-b411-f316513dbb30

10. Hamzehei, S., Akbarzadeh, O., Attar, H., Rezaee, K., Fasihihour, N., & Khosravi, M. R. (2023). Predicting the total Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS) based on ML techniques and cloud-based update. *Journal of Cloud Computing*, 12(1), 12. DOI: https://doi.org/10.1186/s13677-022-00388-1

11. Petryk, M., Bishchak, D., Bachynskyi, M., Brevus, V., Chyzh, V., & Mykhalyk, D. (2024). Analiz mymovil'nykh rukhiv patsiientiv iz symptomamy tremoru pid vplyvom kohnityvnykh vplyviv [Analysis of involuntary movements of patients with tremor symptoms under the influence of cognitive influences] [in Ukrainian]. *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuvannia*, 7(2), 150–165. DOI: https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2024-7-2-14

12. Osiichuk, I. V. (2024). *Rozrobka informatsiinoi systemy dlia diahnostuvannia tremoru z vykorystanniam hrafichnoho planshetu* [Development of information system for tremor diagnosis using a graphics tablet] [in Ukrainian] (Master's thesis). Ternopil. http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44858

13. Farashi, S., Sarihi, A., Ramezani, M., & Kashani, H. (2023). Parkinson's disease tremor prediction using EEG data analysis-A preliminary and feasibility study. *BMC Neurology*, 23(1), 420. DOI: https://doi.org/10.1186/s12883-023-03468-0

14. Mudryk, I. Ya. (2021). *Avtomatyzovani systemy diahnostuvannia stanu patsiientiv, khvorykh na esentsial'nyi tremor* [Automated systems for diagnosing the condition of patients with essential tremor] [in Ukrainian] (PhD thesis abstract). Kyiv. http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/35810

15. Zaiarnyi, M. (2023). Multysensornyi analiz kohnityvnykh syhnaliv dlia nevrolohichnykh rozladiv ta zakhvoriuvan [Multi-sensor analysis of cognitive signals for neurological disorders and diseases] [in Ukrainian]. *Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia*, 1(53), 42–51. http://dspace.zsmu.edu.ua/handle/ 123456789/20444

16. Deuschl, G., Becktepe, J. S., Dirkx, M., Haubenberger, D., Hassan, A., Helmich, R. C., & Elble, R. J. (2022). The clinical and electrophysiological investigation of tremor. *Clinical Neurophysiology*, 136, 93–129. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clinph.2022.01.004

17. Fratello, M., Crisci, D., Mazzeo, P. L., De Marinis, S., Speranza, D., De Natale, C., & Esposito, A. (2021). Classification-based screening of Parkinson's disease patients through graph and handwriting signals. *Engineering Proceedings*, 11(1), 49. DOI: https://doi.org/10.3390/ASEC2021-11128

18. Wilkins, K. B., Petrucci, M. N., Kim, J. W., Goldfinger, M. H., Kehnemouyi, Y. M., & Bronte-Stewart, H. M. (2022). Quantitative digitography measures motor symptoms and disease progression in Parkinson's disease. *Journal of Parkinson's Disease*, 12(6), 1979–1990. DOI: https://doi.org/10.3233/JPD-223264

19. Shirahige, L., Berenguer-Rocha, M., Mendonça, M., Rocha, S., Rodrigues, M., Monteiro, A., & Simis, M. (2020). Quantitative electroencephalography characteristics for Parkinson's disease: a systematic review. *Journal of Parkinson's Disease*, 10(2), 455–470. DOI: https://doi.org/10.3233/JPD-191840

20. Maitín, A. M., García-Tejedor, A. J., & Romero Muñoz, J. P. (2020). Machine learning approaches for detecting Parkinson's disease from EEG analysis: a systematic review. *Applied Sciences*, 10(23), 8662. DOI: https://doi.org/10.3390/app10238662

21. Maitin, A. M., Romero Muñoz, J. P., & García-Tejedor, Á. J. (2022). Survey of machine learning techniques in the analysis of EEG signals for Parkinson's disease: A systematic review. *Applied Sciences*, 12(14), 6967. DOI: https://doi.org/10.3390/app12146967

22. Jackson, N., Cole, S. R., Voytek, B., & Swann, N. C. (2019). Characteristics of waveform shape in Parkinson's disease detected with scalp electroencephalography. *eNeuro*, 6(3), ENEURO.0151-19.2019. DOI: https://doi.org/10.1523/ENEURO.0151-19.2019

23. Schneider, M., Dann, B., Sheshadri, S., Scherberger, H., & Vinck, M. (2020). A general theory of coherence between brain areas. *bioRxiv*, 2020-06. DOI: https://doi.org/10.1101/2020.06.17.156190

24. Mendoza-Armenta, A. A., Palacios-Arellano, E. M., Rodríguez-Montes, D. A., Franco-Santana, R. B., Zalapa-Lúa, R. A., & Gómez-Velázquez, F. R. (2024). Implementation of a Real-Time Brain-to-Brain Synchrony Estimation Algorithm for Neuroeducation Applications. *Sensors*, 24(6), 1776. DOI: https://doi.org/10.3390/s24061776

25. Zhang, Y., Li, R., Zhang, Q., Wang, Y., Song, H., & Li, J. (2022). Synchronous analyses between electroencephalogram and surface electromyogram based on motor imagery and motor execution. *Review of Scientific Instruments*, 93(11), 116104. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0110827

26. Brambilla, C., Pirovano, I., Mira, R. M., Rizzo, G., Scano, A., & Mastropietro, A. (2021). Combined use of EMG and EEG techniques for neuromotor []{.mark}assessment in rehabilitative applications: A systematic review. *Sensors*, 21(21), 7014. DOI: https://doi.org/10.3390/s21217014

27. Tokar, A. S. (2025). *Kliniko-farmakolohichni aspekty zastosuvannia protyparkinsonichnykh preparativ* [Clinical and pharmacological aspects of antiparkinson drugs use] [in Ukrainian]. Kharkiv. https://dspace.nuph.edu.ua/bitstream/123456789/34404/1/ТОКАР%20Аліна%2012.02.2025.pdf

28. Baizabal-Carvallo, J. F., & Morgan, J. C. (2022). Drug-induced tremor, clinical features, diagnostic approach and management. *Journal of the neurological sciences*, 435, 120192. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jns.2022.120192

29. Zham, P., Kumar, D. K., Dabnichki, P., Poosapadi Arjunan, S., & Raghav, S. (2019). Effect of levodopa on handwriting tasks of different complexity in Parkinson's disease: a kinematic study. *Journal of neurology*, 266, 1376–1382. DOI: https://doi.org/10.1007/s00415-019-09268-2

30. Mushta, S. A. (2022). *Analiz elektromiohram metodamy mashynnoho navchannia dlia vyiavlennia khvoroby Parkinsona* [Analysis of electromyograms by machine learning methods to detect Parkinson's disease] [in Ukrainian] (Bachelor's thesis). Kyiv. https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/954e8aae-f9a1-4a85-99c7-db3442f4300a/content

31. Zach, H., Dirkx, M. F., Roth, D., Pasman, J. W., Bloem, B. R., & Helmich, R. C. (2020). Dopamine-responsive and dopamine-resistant resting tremor in Parkinson disease. *Neurology*, 95(11), e1461–e1470. DOI: https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000010316

32. Koren, O., Katz, R., Gorodetsky, C., Porges, O., Amiaz, R., Dasberg, I., & Peretz, C. (2022). Dopaminergic medication reduces interhemispheric hyper-synchronization in Parkinson's disease. *Parkinsonism & Related Disorders*, 97, 39–46. DOI: https://doi.org/10.1016/j.parkreldis.2022.02.009

33. Aprigio, D., Bazile, P., Rocon, E., Fraga, A. A., da Silva, A. S., Velasques, B., & Orsini, M. (2020). Dopaminergic drugs alter beta coherence during motor imagery and motor execution in healthy adults. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, 78(04), 199–205. DOI: 10.1590/0004-282X20190186

34. Zhang, J., Villringer, A., & Nikulin, V. V. (2022). Dopaminergic modulation of local non-oscillatory activity and global-network properties in Parkinson's disease: an EEG study. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 14, 846017. DOI: https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.846017

35. Pierro, A., Calderara, S., Abbiati, M., Cesari, F., Gaiardelli, L., & Conti, F. (2025). Accelerating Linear Recurrent Neural Networks for the Edge with Unstructured Sparsity. *arXiv preprint* arXiv:2502.01330. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.01330

36. Bosch, T. J., van Ingen, S., van Dijk, P. T., Costerus, S. I., van der Stouwe, A. M., Maurits, N. M., & van Laar, T. (2022). Functional connectivity in patients with Parkinson's disease and freezing of gait using resting-state EEG and graph theory. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 36(10–11), 715-725. DOI: https://doi.org/10.1177/15459683221129282

37. Nani, A., Manuello, J., Mancuso, L., Liloia, D., Costa, T., & Cauda, F. (2019). The neural correlates of time: a meta-analysis of neuroimaging studies. *Journal of cognitive neuroscience*, 31(12), 1796–1826. DOI: https://doi.org/10.1162/jocn_a_01459

38. Dirkx, M. F., & Bologna, M. (2022). The pathophysiology of Parkinson's disease tremor. *Journal of the Neurological Sciences*, 435, 120196. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jns.2022.120196

39. Abusrair, A. H., Elsekaily, W., & Bohlega, S. (2022). Tremor in Parkinson's disease: from pathophysiology to advanced therapies. *Tremor and Other Hyperkinetic Movements*, 12, 29. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9504742/

40. Moretti, D. V. (2019). Available and future treatments for atypical parkinsonism. A systematic review. *CNS Neuroscience & Therapeutics*, 25(2), 159–174. DOI: https://doi.org/10.1111/cns.13068

41. Vecchio, F., Miraglia, F., Judica, E., Cotelli, M., Alù, F., & Rossini, P. M. (2021). Graph theory on brain cortical sources in Parkinson's disease: the analysis of 'small world'organization from EEG. *Sensors*, 21(21), 7266. DOI: https://doi.org/10.3390/s21217266

42. Wang, Q., Zhang, H., & Wen, Z. (2020). Characterization of EEG data revealing relationships with cognitive and motor symptoms in Parkinson's disease: a systematic review. *Frontiers in aging neuroscience*, 12, 587396. DOI: https://doi.org/10.3389/fnagi.2020.587396

43. Biriuk, V. V. (2022). *Optymizatsiia diahnostyky ta likuvannia rannikh stadii khvoroby Parkinsona* [Optimization of diagnosis and treatment of early stages of Parkinson's disease] [in Ukrainian] (Doctoral dissertation). Zaporizhzhia. http://dspace.zsmu.edu.ua/handle/123456789/20461

44. Iskhakova, L., Rappel, P., Deffains, M., Fonar, G., Farah, N., Marmor, O., & Bar-Gad, I. (2021). Modulation of dopamine tone induces frequency shifts in cortico-basal ganglia beta oscillations. *Nature communications*, 12(1), 7026. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-021-27375-5

45. Aouraghe, I., Khaissidi, G., & Mrabti, M. (2023). A literature review of online handwriting analysis to detect Parkinson's disease at an early stage. *Multimedia Tools and Applications*, 82(8), 11923–11948. DOI: https://doi.org/10.1007/s11042-022-13759-2

46. Demchenko, A. V., Aravytska, H. N., & Revenko, A. V. (2020). Transkranialna mahnitna stymuliatsiia pry likuvanni motornykh ta nemotornykh symptomiv khvoroby Parkinsona [Transcranial magnetic stimulation in the treatment of motor and non-motor symptoms of Parkinson's disease] *Ukrainskyi nevrolohichnyi zhurnal*, 4, 5–10. DOI: https://doi.org/10.30978/UNJ2020-4-5 [in Ukrainian].

УДК 004.932.4:616-073.97 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.5

О. В. БОЙКО
кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри інформаційних технологій
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0001-8557-2267

М. Д. ТАТАРЕНКО
аспірант кафедри комп'ютерних наук
Сумський державний університет
ORCID: 0009-0000-9649-4620

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ НЕЙРОННИХ МОДЕЛЕЙ У ЗАДАЧАХ ОБРОБКИ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ДІАГНОСТИЧНИХ ЗНІМКІВ

У статті здійснено порівняльний аналіз ефективності застосування простих штучних нейронних мереж (ANN) та згорткових нейронних мереж (CNN) у задачах обробки ультразвукових діагностичних знімків. Актуальність дослідження зумовлена широким використанням УЗД у клінічній практиці та обмеженнями, які притаманні цьому методу візуалізації, зокрема – низькою контрастністю, високим рівнем шуму та залежністю якості зображення від типу апаратури й кваліфікації оператора. В умовах зростаючого обсягу медичних даних і потреби в автоматизованих системах підтримки прийняття рішень нейронні моделі виступають перспективним інструментом підвищення діагностичної інформативності знімків.

Для досягнення мети було проведено експериментальне моделювання із використанням відкритого набору ультразвукових зображень молочної залози, доступного на платформі Kaggle. Вихідні знімки були масштабовані з 500 × 500 до 128 × 128 пікселів з метою зменшення обчислювального навантаження. Було реалізовано дві архітектури: базову ANN з одним прихованим шаром та CNN з трьома згортковими шарами. Моделі оцінювались за метриками точності класифікації, повноти, специфічності, F1-мірою, швидкодією та інтерпретованістю.

Результати дослідження показали, що CNN суттєво перевершує ANN за всіма ключовими критеріями. Середня точність класифікації CNN склала 86,4 % проти 71,3 % у ANN. Важливо, що CNN забезпечувала кращу стабільність результатів при зміні джерел даних та рівня шуму, а також дозволяла використовувати Grad-CAM для візуалізації ділянок з найбільшим впливом на класифікаційне рішення. ANN, у свою чергу, виявилась менш чутливою до локальних текстурних ознак, проте мала перевагу в обчислювальній простоті.

Зроблено висновок про доцільність використання CNN у клінічних умовах, де пріоритетом є точність та надійність результатів, тоді як ANN може бути корисною в системах попередньої фільтрації або в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Стаття також підкреслює важливість врахування апаратних особливостей джерел зображень та перспективність розвитку гібридних архітектур з високим рівнем інтерпретованості.

Ключові слова: *нейронні мережі, нейрон, згорткові нейронні мережі, штучні нейронні мережі, навчання нейронної мережі, обробка зображень, ультразвукова діагностика, глибинне навчання.*

O. V. BOYKO
Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Information Technology
Sumy State University
ORCID: 0000-0001-8557-2267

M. D. TATARENKO
Postgraduate Student at the Computer Science Department
Sumy State University
ORCID: 0009-0000-9649-4620

ANALYSIS OF NEURAL MODEL EFFECTIVENESS IN ULTRASOUND DIAGNOSTIC IMAGE PROCESSING

This article presents a comparative analysis of the effectiveness of using simple artificial neural networks (ANN) and convolutional neural networks (CNN) for processing ultrasound diagnostic images. The relevance of the study stems from the widespread use of ultrasound imaging in clinical practice, along with its inherent limitations such as low contrast, high noise levels, and dependency on both the equipment and operator's experience. In the context of increasing volumes of medical data and the growing need for automated decision support systems, neural models offer a promising tool for enhancing the diagnostic value of ultrasound images.

To achieve the research objective, an experimental simulation was conducted using an open-access dataset of breast ultrasound images available on the Kaggle platform. The original images were downscaled from 500 × 500 to 128 × 128 pixels to reduce computational load. Two neural network architectures were implemented: a basic ANN with a single hidden layer and a CNN with three convolutional layers. The models were evaluated based on classification accuracy, recall, precision, F1-score, inference speed, and interpretability.

The results demonstrated that CNN significantly outperformed ANN across all major performance metrics. CNN achieved an average classification accuracy of 86.4 %, compared to 71.3 % for ANN. Furthermore, CNN provided more stable performance under varying image quality and noise conditions and enabled the use of Grad-CAM for highlighting the most influential regions in the decision-making process. While ANN was less sensitive to local textural features, it offered advantages in computational simplicity and inference speed (under 5 ms per image).

The study concludes that CNN is more suitable for clinical settings where accuracy and reliability are critical, whereas ANN may be useful for preliminary filtering or in systems with limited computational resources. The article also emphasizes the importance of considering hardware-specific variations in image sources and highlights the future potential of hybrid, interpretable neural architectures in medical imaging.

Key words: *neural networks, neuron, convolutional neural networks (CNN), artificial neural networks (ANN), neural network training, image processing, ultrasound diagnostics, deep learning.*

Постановка проблеми

Ультразвукова діагностика (УЗД) є одним із найбільш поширених та доступних методів візуалізації в сучасній медичній практиці. Її безпечність, відносна дешевизна та оперативність забезпечують широке застосування у багатьох галузях клінічної медицини – від акушерства до онкології. Однак, незважаючи на численні переваги, якість отриманих зображень залишається обмеженою через фізичні властивості ультразвукових хвиль та анатомо-фізіологічні характеристики тканин. До основних факторів, що знижують діагностичну інформативність УЗ-зображень, належать дифракційні ефекти, аберації, шумові спотворення, розсіювання хвиль та артефакти, зумовлені неоднорідністю акустичних середовищ.

Особливої актуальності проблема набуває в умовах необхідності детальної візуалізації дрібних структур, таких як малі новоутворення, дрібні судини чи дифузні зміни паренхіми органів. Традиційні методи покращення зображення мають обмежену ефективність та не дозволяють суттєво підвищити роздільну здатність без втрати клінічно значимої інформації.

У цьому контексті зростає роль штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж, як інструменту постобробки ультразвукових зображень. Сучасні моделі машинного навчання, зокрема згорткові нейронні мережі, трансформери та генеративні архітектури, демонструють високий потенціал у задачах покращення візуального представлення медичних даних. Проте ефективність різних підходів у контексті саме ультразвукових зображень є неоднозначною та потребує системного аналізу з урахуванням особливостей УЗД – високої варіативності знімків, наявності великої кількості шумів і складності анотування даних.

Проблема вибору та оцінки нейронної архітектури, яка забезпечить найкращий баланс між якістю реконструкції, обчислювальною ефективністю та клінічною інтерпретованістю результатів, залишається відкритою, так само як і питання інтеграції таких рішень у медичні системи з дотриманням нормативних вимог і забезпеченням прозорості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасній науковій літературі все більшої популярності набувають дослідження, присвячені застосуванню нейронних мереж для покращення якості ультразвукових знімків, які є одним із ключових інструментів у діагностичному процесі в різних галузях медицини. УЗД використовується в акушерстві, кардіології, гастроентерології, ангіології та інших спеціальностях завдяки своїй неінвазивності, доступності й високій швидкості обстеження. Водночас ультразвукові зображення мають низький рівень контрастності, високу залежність від якості апаратури та досвіду оператора, а також зазнають значного впливу шумів та артефактів. У зв'язку з цим значна частина сучасних дослідницьких зусиль зосереджена на підвищенні точності діагностики шляхом використання глибоких моделей машинного навчання для вдосконалення зображень, покращення їх інтерпретованості та автоматизованого аналізу.

Незважаючи на розмаїття нейромережевих архітектур, які пропонуються для обробки зображень, одним із базових підходів залишається використання простих штучних нейронних мереж (ANN) із одним прихованим шаром. Такі моделі мають переваги у вигляді низької обчислювальної складності та швидкого навчання, що робить їх зручними для використання в системах із обмеженими ресурсами або в якості базових референтних моделей для порівняльного аналізу. У роботі Kim & Kim [1] демонструється використання ANN для класифікації ультразвукових зображень. Хоча результати свідчать про здатність таких моделей до розпізнавання основних категорій зображень, їх ефективність є обмеженою в задачах високоточного виявлення патологій через неспроможність обробляти складні просторові залежності, властиві медичним знімкам.

Значну перевагу в подібних завданнях демонструють згорткові нейронні мережі (CNN), які побудовані з урахуванням просторової структури зображень. CNN здатні виділяти локальні ознаки, виявляти контури, текстури та інші ключові деталі, що суттєво підвищує точність класифікації та локалізації об'єктів. Наприклад, у дослідженні Wu та співавт. [2] виконано пряме порівняння CNN і ANN на множині УЗ-зображень, отриманих з різних типів апаратів. Згідно з результатами, CNN забезпечує покращення точності діагностичної класифікації на 15–20 %, що є суттєвим у клінічному контексті. Додатково автори підкреслюють важливість врахування характеристик апаратного забезпечення: враховуючи, що різні ультразвукові сканери продукують зображення зі змінними характеристиками, CNN виявились більш адаптивними до таких відмінностей.

У клінічній практиці важливо не лише отримати точний результат класифікації або сегментації, але й зрозуміти, чому модель прийняла те чи інше рішення. Саме тому інтерпретованість моделей відіграє дедалі важливішу роль. Метод Grad-CAM (Gradient-weighted Class Activation Mapping), описаний у роботі Selvaraju та ін. [3], дозволяє створювати теплові карти, які відображають зони, що були найбільш значущими для прийняття рішення CNN. У контексті УЗ-зображень цей підхід допомагає лікарю зіставити прогноз моделі з реальним анатомічним вмістом, і таким чином забезпечує додатковий рівень довіри до автоматизованої системи. Інтерпретованість також важлива у навчанні молодих спеціалістів, які можуть використовувати такі візуалізації для розуміння діагностичних критеріїв.

Ще одним аспектом, який активно розглядається у наукових роботах, є баланс між точністю та обчислювальною ефективністю. Це особливо актуально для впровадження моделей на портативних пристроях або в умовах обмежених ресурсів, наприклад, у сільських лікарнях чи під час виїзної діагностики. У дослідженні Zhang та ін. [4] було проаналізовано використання легких архітектур, таких як MobileNet, для обробки УЗ-зображень у режимі реального часу. Хоча ANN має перевагу у швидкості, CNN продемонструвала кращу здатність до виявлення патологічних структур при збереженні низької затримки, що робить її практично прийнятною для клінічного використання навіть без графічного процесора.

Ще один важливий виклик – це доступність анотованих медичних даних. Велика кількість моделей вимагає для навчання значної кількості маркованих зображень. У роботі Chen та ін. [5] розглянуто підходи до навчання CNN в умовах обмежених анотованих наборів даних за допомогою методів слабкого навчання та перенавчання (transfer learning). Автори довели, що попереднє тренування моделей на суміжних задачах, навіть не з медичної сфери, дозволяє успішно адаптувати їх до специфіки ультразвукових зображень. Це відкриває нові можливості для малих клінік і дослідницьких центрів, які не мають доступу до великих відкритих датасетів.

Таким чином, на основі аналізу сучасних публікацій можна зробити висновок, що згорткові нейронні мережі мають істотну перевагу над простими ANN у задачах покращення ультразвукових зображень. Вони демонструють вищу точність класифікації, кращу інтерпретованість, адаптивність до апаратного різноманіття та ефективність у реальному часі. Це робить CNN одними з найперспективніших інструментів для впровадження в клінічну практику обробки УЗ-даних, особливо в умовах високої варіативності зображень та потреби у пояснюваності результатів.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є системний аналіз ефективності простих нейронних мереж та згорткових нейронних мереж (CNN) у задачах обробки ультразвукових діагностичних знімків з акцентом на точність діагностики та інтерпретованість моделей.

Завданнями дослідження є:

- порівняти продуктивність простої нейронної мережі з одним прихованим шаром та CNN у контексті класифікації патологій на УЗ-знімках;
- оцінити вплив характеристик апаратного забезпечення на якість обробки та точність моделей;
- проаналізувати можливості підвищення інтерпретованості результатів за допомогою методів візуалізації (наприклад, Grad-CAM);
- визначити компроміс між обчислювальною складністю моделей та їх клінічною ефективністю;
- розробити рекомендації щодо вибору нейронної архітектури для інтеграції у медичні інформаційні системи.

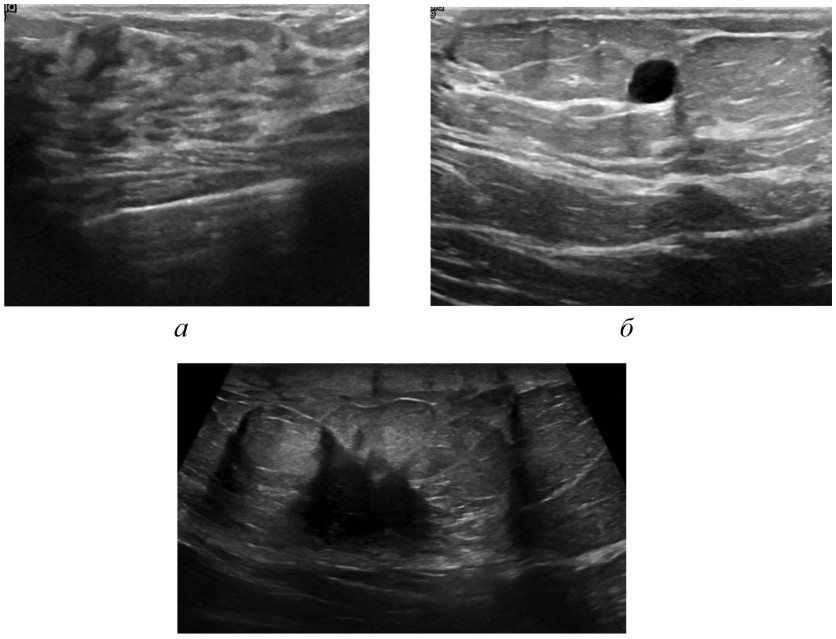
Досягнення поставленої мети сприятиме підвищенню якості ультразвукової діагностики за рахунок впровадження оптимальних нейронних моделей, що забезпечать баланс між точністю, швидкодією і прозорістю результатів, а також адаптацію до особливостей різного апаратного забезпечення.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для реалізації поставленої мети було обрано два типи нейронних мереж – проста штучна нейронна мережа (ANN) з одним прихованим шаром та згорткова нейронна мережа (CNN) із базовою трирівневою архітектурою. Обидва підходи були протестовані в умовах обробки різних типів ультразвукових знімків.

У якості джерела даних було використано відкритий набір «Breast Ultrasound Images Dataset», доступний на платформі Kaggle [1]. Цей набір даних є відкритим медичним ресурсом, який використовується для навчання та тестування моделей машинного навчання у завданнях виявлення та класифікації новоутворень молочної залози. У ньому представлено 780 ультразвукових знімків, отриманих від 600 пацієнток.

Кожне зображення позначене відповідною міткою, яка вказує на тип тканини: нормальна, доброякісна або злоякісна. Завдяки такій класифікації цей набір даних є придатним для задач навчання з вчителем. Окрім самих знімків, у ньому також містяться маски (розмітки), що відображають контури уражених ділянок. Це дозволяє використовувати дані не лише для класифікації, але й для сегментації, що є важливим у випадках, коли необхідно локалізувати новоутворення.



а *б*

в

Рис. 1. Класифікація новоутворень за типом тканини: *а*) нормальне (пухлини відсутні), *б*) доброякісне, *в*) злоякісне

Для уніфікації обробки та зниження обчислювального навантаження всі знімки були зменшені з початкової роздільної здатності 500 × 500 пікселів до 128 × 128 пікселів.

Дані для дослідження були неанотованими, а тому попередня обробка включала нормалізацію яскравості, зменшення шуму за допомогою медіанного фільтра та стандартизоване масштабування. Таким чином забезпечено однакові умови для обох архітектур.

Проста ANN містила вхідний шар розміром 16 384 (для 128 × 128 зображень, представлених у векторному вигляді), один прихований шар із 128 нейронів із функцією активації ReLU та вихідний шар для двокласової класифікації (наявність/відсутність патології). Така архітектура дозволяла забезпечити швидке навчання і низьке навантаження на апаратну частину, але мала суттєві обмеження щодо просторового сприйняття зображення.

CNN-архітектура включала три згорткові шари з ядрами 3 × 3, за якими слідували шари підвибірки (max-pooling), та два повнозв'язні шари на завершення. Для регуляризації використовувалась відсічення (dropout) на рівні 0.4. Загальна кількість параметрів складала близько 110 тис., що вважається середнім показником обчислювальної складності для подібних задач. Усі шари активувались функцією ReLU, крім останнього (Softmax).

Точність діагностики визначалася на підставі візуального розпізнавання патологічних елементів (наприклад, гіпоехогенних зон, зміненої структури тканин) та формальної оцінки за метриками precision, recall і F1-score. ANN показала середню точність на рівні 71,3 %, із помітними похибками при обробці зображень низької якості. Найчастіше мережа помилково інтерпретувала тіньові артефакти як ознаки патології.

Натомість CNN продемонструвала суттєво вищу стабільність результатів із середньою точністю 86,4 % та помітно кращою чутливістю до локальних текстурних особливостей. Навіть за умов невеликої кількості навчальних прикладів, CNN успішно виділяла структурні контури органів, що мало вирішальне значення для ідентифікації патологій. У тестових прикладах вона краще справлялася з розмежуванням тканин, зокрема в ділянках із поганим контрастом.

Однією з ключових переваг CNN стала можливість використання методу Grad-CAM для візуалізації ділянок, які модель вважає найбільш релевантними для класифікаційного рішення. Це дозволило виявити, що мережа концентрує увагу на ділянках зі зміненими ехоструктурами та межами органів. У випадку з ANN, візуальна інтерпретація була обмежена через втрату просторової інформації, адже мережа оперувала лише векторизованими пікселями без урахування локального контексту.

Під час тестування було зафіксовано час обробки одного зображення (інференс) для кожної моделі. ANN виконувала класифікацію менш ніж за 5 мс, тоді як CNN потребувала приблизно 35 мс – цей показник залишався прийнятним навіть для реального часу. Обидві моделі також були протестовані на ноутбуку середнього класу без GPU, що демонструє їхню практичну придатність до інтеграції у медичні інформаційні системи на рівні місцевих клінік.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика ANN та CNN для обробки УЗД-зображень

Параметр	ANN (1 прихований шар)	CNN (3 згорткові шари)
Середня точність діагностики (%)	71,3 %	86,4 %
Recall (повнота)	68,5 %	84,1 %
Precision (точність)	72,9 %	88,2 %
F1-score	70,6 %	86,1 %
Час обробки 1 зображення (мс)	~5 мс	~35 мс
Можливість інтерпретації результатів	Обмежена	Висока (Grad-CAM)
Стійкість до шуму/артефактів	Низька	Середньо-висока
Адаптація до різних апаратів	Слабка	Задовільна
Обчислювальна складність	Низька	Середня
Придатність для реального часу	Висока	Висока (без GPU)

Висновки

У ході проведеного дослідження було здійснено комплексний аналіз ефективності застосування простих нейронних мереж та згорткових нейронних мереж (CNN) у задачах обробки ультразвукових діагностичних знімків. Ультразвукова діагностика, як один із найбільш поширених і доступних методів медичної візуалізації, має суттєві обмеження, пов'язані з фізичними властивостями ультразвукових хвиль, що призводить до появи шумів, артефактів та низької контрастності зображень. Це ускладнює точну інтерпретацію знімків і підвищує значення автоматизованих методів обробки, які можуть допомогти лікарям у постановці діагнозу.

Порівняльний аналіз показав, що згорткові нейронні мережі суттєво перевершують прості нейронні мережі з одним прихованим шаром за точністю класифікації патологій на ультразвукових знімках. CNN демонструють високу стійкість до шумів і варіативності даних, що забезпечує більш надійні результати, особливо у складних клінічних випадках. Крім того, можливість застосування інтерпретованих методів візуалізації, таких як Grad-CAM, дозволяє лікарям бачити, які саме ділянки зображення вплинули на рішення моделі, що підвищує довіру до автоматизованих систем і сприяє їх впровадженню у клінічну практику. Водночас прості нейронні мережі мають переваги у швидкості обробки та меншій обчислювальній складності, що робить їх корисними для систем з обмеженими ресурсами або для швидкої попередньої обробки даних.

Важливою складовою ефективності нейронних моделей є якість вхідних ультразвукових знімків, яка значною мірою залежить від характеристик апаратного забезпечення – типу датчика, частоти ультразвуку, параметрів сканування та інших факторів. Виявлено, що CNN краще адаптуються до варіацій якості зображень, зберігаючи високу точність навіть за наявності шумів і артефактів, тоді як прості нейронні мережі втрачають продуктивність у таких умовах. Це підкреслює необхідність врахування особливостей апаратури при розробці та впровадженні моделей, а також важливість використання різноманітних та репрезентативних наборів даних для навчання.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з оптимізацією нейронних мереж для роботи у реальному часі, інтеграцією моделей у медичні інформаційні системи з дотриманням стандартів обробки медичних даних (DICOM, HL7), а також розробкою гібридних архітектур, які поєднують переваги CNN і трансформерів. Не менш важливою є співпраця з клініцистами для якісного анотування даних і оцінки результатів, що сприятиме підвищенню довіри до автоматизованих систем і їх широкому впровадженню.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що застосування згорткових нейронних мереж у задачах обробки ультразвукових діагностичних знімків є ефективним і перспективним напрямом, який здатен суттєво підвищити якість діагностики та автоматизувати аналіз медичних даних. Водночас врахування особливостей апаратного забезпечення та оптимізація моделей для конкретних клінічних умов залишаються ключовими завданнями для подальшого розвитку цієї галузі.

Список використаної літератури

1. Kim T., Kim J. A shallow neural network approach for ultrasound image classification. Biomedical Engineering Letters. 2021. Vol. 11, No. 3. P. 315–321. DOI: https://doi.org/10.1007/s13534-021-00207-7

2. Wu Y., He K., Li H. Comparative performance of CNN and shallow ANN in ultrasound image enhancement. Ultrasonic Imaging. 2022. Vol. 44, No. 2. P. 105–120. DOI: https://doi.org/10.1177/01617346211037324

3. Selvaraju R. R. et al. Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-based Localization. International Journal of Computer Vision. 2020. Vol. 128. P. 336–359. DOI: https://doi.org/10.1007/s11263-019-01228-7

4. Zhang L., Wang S., Liu Q. Lightweight convolutional networks for real-time ultrasound image interpretation. Sensors. 2023. Vol. 23, No. 6. Article 2874. DOI: https://doi.org/10.3390/s23062874

5. Chen X., Zhou Y., Li R. Ultrasound image analysis using weak supervision and transfer learning. Computers in Biology and Medicine. 2021. Vol. 134. Article 104478. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104478

6. Aryashah2k. Breast Ultrasound Images Dataset. Kaggle. URL: https://www.kaggle.com/datasets/aryashah2k/breast-ultrasound-images-dataset (дата звернення: 20.05.2025)

References

1. Kim T., Kim J. (2021) A shallow neural network approach for ultrasound image classification., vol. 11, no. 3, pp. 315–321. https://doi.org/10.1007/s13534-021-00207-7

2. Wu Y., He K., Li H. (2022) Comparative performance of CNN and shallow ANN in ultrasound image enhancement. *Ultrasonic Imaging*, vol. 44, no. 2, pp. 105–120. https://doi.org/10.1177/01617346211037324

3. Selvaraju R. R., Cogswell M., Das A., Vedantam R., Parikh D., Batra D. (2020) Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-based Localization. *International Journal of Computer Vision*, vol. 128, pp. 336–359. https://doi.org/10.1007/s11263-019-01228-7

4. Zhang L., Wang S., Liu Q. (2023) Lightweight convolutional networks for real-time ultrasound image interpretation. *Sensors*, vol. 23, no. 6, article 2874. https://doi.org/10.3390/s23062874

5. Chen X., Zhou Y., Li R. (2021) Ultrasound image analysis using weak supervision and transfer learning. *Computers in Biology and Medicine*, vol. 134, article 104478. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104478

6. Aryashah2k (2020) Breast Ultrasound Images Dataset. *Kaggle*. Retrieved from: https://www.kaggle.com/datasets/aryashah2k/breast-ultrasound-images-dataset (accessed May 20, 2025).

УДК 004.023 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.6

І. Г. БУГАЄВА
кандидат технічних наук,
доцент кафедри технічної кібернетики
й інформаційних технологій ім. проф. Р. В. Меркта
Одеський національний морський університет
ORCID: 0000-0002-2839-9266

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ РОЗВ'ЯЗАННЯ ДВОВИМІРНОЇ ЗАДАЧІ УПАКОВКИ

Задача упаковки є актуальною і зустрічається у багатьох промислових виробництвах. Вона належить до класу NP-складних задач, тому використання точного перебірного алгоритму можливе лише для задач невеликої розмірності. Метаевристичні методи є популярним інструментом для наближеного вирішення складних комбінаторних оптимізаційних задач. У статті розглядається розв'язання задачі упаковки прямокутників у напівнескінченну смугу фіксованої ширини за допомогою генетичного алгоритму. Метою статті є дослідження впливу генетичних операторів схрещування та відбору на ефективність роботи алгоритму. У роботі наводиться постановка задачі, представлено генетичні оператори кросинговеру та відбору, які використовуються в алгоритмі. Розв'язання задачі упаковки ділиться на два етапи: визначення за допомогою генетичного алгоритму перестановки для послідовності пакування прямокутних елементів та застосування алгоритму декодування для їх розміщення у смузі. В якості декодеру використовувся алгоритм BLF. Проведено обчислювальний експеримент на тестових прикладах, відомих з літературних джерел, а також на двох згенерованих наборах прямокутників. Всі тестові задачі, що використовуються в цьому дослідженні, мають оптимальне рішення з мінімально допустимою довжиною зайнятої частини смуги. Програму реалізовано за допомогою мови програмування Python та пакету Deap. Аналіз результатів експериментів показав, що найкращі рішення задачі упаковки прямокутників у напівнескінченну смугу було отримано при використанні в генетичному алгоритмі оператора схрещування PMX та оператора турнірного відбору. Генетичний алгоритм показав найгірший результат при застосуванні оператора кросинговеру UPMX та відбору за правилом рулетки.

Ключові слова: *двовимірна задача упаковки, генетичний алгоритм, генетичні оператори, оптимізація.*

I. H. BUHAIEVA
Ph.D., Associate Professor at the Department of Technical Cybernetics
and Information Technologies named after Professor R.V. Merkt
Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-2839-9266

ANALYSIS OF PARAMETERS OF GENETIC ALGORITHM FOR SOLVING TWO-DIMENSIONAL PACKING PROBLEM

The task of packaging is a topical one and is encountered in many industrial productions. It belongs to the class of NP-hard problems, so the use of an exact enumeration algorithm is possible only for small-dimensional problems. Metaheuristic methods are a popular tool for the approximate solution of complex combinatorial optimization problems. The article considers solving the problem of packing rectangles into a semi-infinite strip of fixed width using a genetic algorithm. The purpose of the article is to study the influence of genetic operators of crossover and selection on the efficiency of the algorithm. The paper provides a statement of the problem, presents the genetic operators of crossover and selection used in the algorithm. The solution of the packing problem is divided into two steps: determining the permutation for the packing sequence of rectangular elements using a genetic algorithm, and applying a decoding algorithm to place them in the strip. The BLF algorithm was used as a decoder. A computational experiment was carried out on test examples known from literary sources, as well as on two generated sets of rectangles. All test problems used in this study have an optimal solution with the minimum admissible length of the occupied part of the strip. The program is implemented using the Python programming language and the Deap package. Analysis of the experimental results showed that the best solutions to the problem of packing rectangles into a semi-infinite strip were obtained when using the PMX crossover operator and the tournament selection operator in the genetic algorithm. The genetic algorithm showed the worst result when using the UPMX crossover operator and roulette selection.

Key words: *two-dimensional packing problem, genetic algorithm, genetic operators, optimization.*

Постановка проблеми

У статті розглядається двовимірна задача упаковки прямокутників у напівнескінченну смугу. Задача є актуальною і зустрічається у промислових виробництвах у таких галузях, як, наприклад, паперова, скляна, текстильна.

Вона полягає в тому, що необхідно розмістити деяку кількість невеликих прямокутних об'єктів у напівнескінченній смузі фіксованої ширини таким чином, щоб їхні сторони були паралельні сторонам смуги та довжина зайнятої смуги була мінімальною.

Для вирішення цієї задачі існує безліч методів: точні методи, запропоновані Гілмором та Гоморі, різні евристики та метаевристики.

Задача упаковки є NP-складною. Зі збільшенням кількості прямокутників, які пакуються у смугу, різко зростає кількість можливих варіантів розміщення прямокутників і розв'язати точними методами задачу за поліноміальний час неможливо. Популярним інструментом для наближеного вирішення складних комбінаторних оптимізаційних задач є метаевристики – генетичні алгоритми, метод імітації відпалу, пошук з заборонами та інші.

Генетичні алгоритми для розв'язання оптимізаційних задач були запропоновані Джоном Холландом у 1975 році та широко використовуються в даний час.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є дослідження впливу генетичних операторів кросинговеру та відбору на ефективність роботи генетичного алгоритму розв'язання двовимірної задачі упаковки прямокутників у напівнескінченну смугу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У статті [1] наведено огляд двовимірних задач розкрою та упаковки. Автори розглядають основні формулювання та методи рішення для двовимірних ортогональних задач розрізання та пакування, де і предмети, і контейнери є прямокутниками. У роботі описано основні методи попередньої обробки даних та релаксації, коротко розглянуто евристичні та апроксимаційні алгоритми для чотирьох основних завдань з літератури: пошук упаковки з мінімальною висотою, пакування елементів у мінімальну кількість контейнерів, знаходження упаковки з максимальною цінністю та визначення існування допустимої упаковки.

У роботі [2] розглядаються двовимірні задачі упаковки в контейнери з шириною W і висотою H (2BP) і контейнер з шириною W і нескінченною висотою, званий смугою (2SP). Обговорюються математичні моделі двовимірних задач упаковки, класичні алгоритми наближення, а також евристичні та метаевристичні методи.

Задачі розміщення набору прямокутних елементів на смузі мінімальної висоти присвячена стаття [3]. Автори представляють алгоритм табу-пошуку, генетичний алгоритм та гібридний алгоритм, який поєднує два підходи. Продуктивність запропонованих алгоритмів оцінюється за допомогою обчислювальних експериментів на прикладах з літератури та на випадково згенерованих прикладах.

У статті [4] запропоновано генетичний алгоритм, який використовує як декодер BL алгоритм розміщення прямокутників у напівнескінченну смугу. Наведено результати експериментів на двох наборах прямокутників. У першому наборі J1 25 прямокутників різних розмірів, набір J2 включає 50 прямокутних елементів. Порівнюються шаблони упаковки, отримані з використанням евристики – алгоритму BL та із застосуванням метаевристики – генетичного алгоритму, де як декодер використовується BL-алгоритм. Застосування генетичного алгоритму забезпечує зменшення висоти пакування прямокутників на 19 %.

У роботі [5] на семи тестових задачах C1–C7 порівнюються результати роботи евристик BL та BLF, а також результати застосування різних метаевристик, у тому числі генетичних алгоритмів, комбінованих з BL та BLF алгоритмами. Результати експериментів показали, що використання в генетичному алгоритмі в якості декодера евристики BLF дає кращі результати у порівнянні з алгоритмом BL, особливо зі збільшенням кількості прямокутників у тестовому наборі.

Викладення основного матеріалу дослідження

Постановка задачі. Розглядається двовимірна задача ортогональної упаковки прямокутників в напівнескінченну смугу. Даний набір із n прямокутних елементів, кожен із яких визначається шириною w_i і довжиною l_i ($i = 1, \ldots, n$). Дана область упаковки (напівнескінченна смуга) шириною W. Необхідно так розташувати набір прямокутних елементів на напівнескінченній смузі, щоб їх w-ребра були паралельні W-ребру смуги та щоб довжина зайнятої частини смуги була мінімальною.

Введемо прямокутну систему координат XOY. Припускаємо, що вісь Ox збігається з верхньою необмеженою стороною смуги, Oy – з бічною стороною смуги. При цьому прямокутники не повинні накладатися один на одного і виходити за межі смуги:

$$((x_i \geq x_j + l_j) \vee (x_j \geq x_i + l_j)) \vee ((y_i \geq y_j + w_j) \vee (y_j \geq y_i + w_i)), \quad i, j = 1, 2, \ldots, n, \; i \neq j;$$

$$(x_i \geq 0) \vee (y_i \geq 0) \vee (y_i + w_i \leq W), \quad i = 1, 2, \ldots, n,$$

де (x_i, y_i) – координати лівого нижнього кута і-го прямокутника на смузі. Повороти прямокутників не допускаються.

Мета задачі – отримати схему упаковки, яка мінімізує довжину зайнятої частини смуги L, тобто знайти такий набір координат (x_i, y_i), $i = 1, 2, \ldots, n$, щоб $L = \max\limits_i (x_i + l_i) \to \min$.

Алгоритми декодування. Схема упаковки прямокутників у напівнескінченну смугу представляється перестановкою, яка відповідає послідовності, в якій прямокутники повинні розміщуватись у смузі. Розв'язання задачі упаковки ділиться на два етапи: визначення перестановки для послідовності розміщення прямокутних елементів

та застосування алгоритму їх розміщення у смузі (алгоритма декодування). Існує безліч алгоритмів декодування, наприклад, такі як BL (bottom-left), BLF (bottom-left-fill), IBL (improved bottom-left).

Алгоритм BL (нижній лівий) [6] упаковує прямокутники в заданому порядку в міру їхнього послідовного вилучення зі списку. Прямокутник спочатку розміщується у верхньому правому куті основного об'єкта, переміщається вниз наскільки можливо, а потім вліво.

В алгоритмі IBL (удосконалений нижній лівий) [7] прямокутний елемент переміщається вниз і ліворуч, поки він не зможе рухатися далі. Різниця між алгоритмом BL та покращеним алгоритмом IBL полягає в тому, що прямокутник в алгоритмі IBL переміщається з перевіркою нижнього порожнього простору.

Алгоритм BLF (нижній лівий із заповненням) [8] намагається помістити прямокутник у найнижчу доступну позицію основного об'єкта та вирівняти її по лівому краю. У порівнянні з алгоритмами BL та IBL, алгоритм BLF має більш щільні шаблони компонування.

Генетичний алгоритм. В теорії про генетичні алгоритми структура даних називається генотипом, а її декодування – фенотипом [9]. У задачі упаковки результатом декодування є шаблон упаковки прямокутників. Генотип представляє собою перестановку цілих чисел, яка задає послідовність упаковки прямокутників у смугу.

У даній роботі для розв'язання задачі упаковки генетичний алгоритм використовується для отримання перестановок, а алгоритм BLF – для розміщення прямокутників у смузі відповідно до певної перестановки.

Для тестування алгоритму, який було реалізовано за допомогою мови програмування Python та пакету Deap, використовувалося кілька наборів даних: відомі з літературних джерел тести J1, J2 [4], набори даних P1 кожного з тестів C1–C6 [5], а також два випадково згенерованих набору елементів T1, T2 з 61 і 31 прямокутниками відповідно. Всі тестові задачі в цьому дослідженні мають оптимальні рішення з мінімально допустимою довжиною зайнятої частини смуги.

Наприклад, схема упаковки з оптимальним розміщенням прямокутників у смузі шириною $W = 120$ для тестового завдання T1 представлена на рисунку 1. Довжина зайнятої частини смуги $L_{opt} = 150$.

Оператори відбору. Серед операторів відбору найбільш поширеними є два імовірнісних оператори:

– турнірний відбір: у кожному раунді турнірного відбору з популяції випадково вибирається певна кількість особин, і та, у якої пристосованість більша, відбирається у наступне покоління;

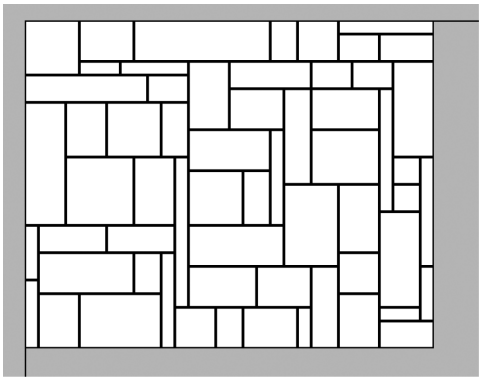


Рис. 1. Оптимальна схема упаковки для задачі T1, $L_{opt} = 150$

– відбір пропорційно пристосованості (відбір за правилом рулетки): кожній особині призначається ймовірність, що дорівнює відношенню її пристосованості до сумарної пристосованості популяції; потім відбувається відбір всіх особин популяції для подальшої генетичної обробки згідно з величиною ймовірності. При такому відборі члени популяції з більш високою пристосованістю з більшою ймовірністю частіше вибиратимуться, ніж особини з низькою пристосованістю.

Оператори схрещування. Оскільки цілочисельні хромосоми представляють індекси впорядкованого списку, використовувалися оператори схрещування, що гарантують, що завжди створюється допустимий нащадок [10]:

– Order Crossover (OX);
– Partially Mapped Crossover (PMX);
– Uniform Partial Mapped Crossover (UPMX).

При упорядкованому схрещуванні (OX) випадково вибираються дві точки розрізу хромосом-батьків. Гени, розташовані між двома точками в обох хромосомах, обмінюються між собою. Потім у кожному нащадку заповнюються гени, для чого використовуються гени відповідного батька, починаючи з наступного за другою точкою розрізу і переносяться тільки ті значення, яких ще немає в нащадку.

У методі схрещування з частковим зіставленням (PMX) дві точки схрещування вибираються випадковим чином у хромосомах-батьках. Гени першої хромосоми, розташовані між цими точками, обмінюються з генами

другої хромосоми, що бере участь у схрещуванні. Відображення значень генів при обміні використовується для заповнення інших генів обох хромосом. При цьому виключається дублювання значень генів.

Рівномірне схрещування із частковим зіставленням (UPMX) генерує двох нащадків шляхом зіставлення пар значень, що відповідають індексам, обраним випадковим чином у двох батьках, та обміну значеннями кожної з пар у нащадках, які спочатку є копіями батьків.

Оператор мутації. В генетичному алгоритмі використовувався оператор мутації Shuffle, який перетасовує елементи вхідної послідовності із заданою ймовірністю переміщення кожного елемента.

Результати досліджень. В роботі досліджувався вплив операторів схрещування OX, PMX, UPMX та операторів турнірного відбору та відбору за правилом рулетки на ефективність роботи генетичного алгоритму розв'язання задачі упаковки прямокутників у напівнескінченну смугу.

Використовувалися такі значення параметрів алгоритму: розмір популяції – 100, ймовірність мутації – 0,1, ймовірність схрещування – 0,9, кількість поколінь – 100. Програма виконувалася з однаковими параметрами для кожного тестового набору даних по десять разів.

Результати експериментів наведено у вигляді значень відносних відхилень обчислених довжин зайнятої смуги L від оптимальної довжини L_{opt}:

$$dev = \frac{L - L_{opt}}{L_{opt}} \cdot 100\ \%.$$

В таблиці 1 представлені значення відносних відхилень dev (%) для кращих рішень тестових задач.

Таблиця 1

Результати експериментів – мінімальні значення dev (%)

Тестові приклади	Оператор схрещування					
	OX		PMX		UPMX	
	Оператор відбору					
	турнір	рулетка	турнір	рулетка	турнір	рулетка
C1/P1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C2/P1	6,67	6,67	0,00	6,67	6,67	6,67
C3/P1	3,33	3,33	6,67	10,00	10,00	10,00
C4/P1	5,00	6,67	6,67	8,33	6,67	8,33
C5/P1	0,00	1,11	0,00	0,00	0,00	2,22
C6/P1	5,83	7,5	5,83	7,50	8,33	10,83
J1	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67
J2	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67
T1	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	6,67
T2	6,67	6,67	3,33	6,67	3,33	6,67

Середні значення відносних відхилень dev (%), які обчислені по результатах десяти прогонів алгоритму для кожної тестової задачі, наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

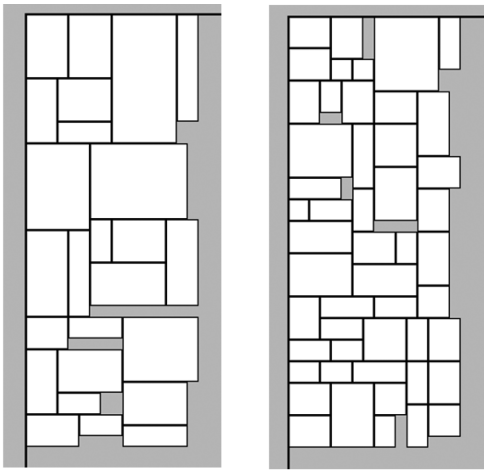
Результати експериментів – середні значення dev (%)

Тестові приклади	Оператор схрещування					
	OX		PMX		UPMX	
	Оператор відбору					
	турнір	рулетка	турнір	рулетка	турнір	рулетка
C1/P1	0,50	0,50	0,50	2,00	4,50	4,00
C2/P1	6,67	6,67	6,00	6,67	6,67	6,67
C3/P1	6,00	6,33	7,33	10,33	11,00	12,00
C4/P1	8,33	9,17	8,33	9,83	9,33	11,50
C5/P1	0,44	0,88	0,22	1,11	0,67	2,89
C6/P1	7,25	8,33	6,11	8,89	9,17	11,39
J1	7,33	7,33	7,33	8,00	9,33	10,67
J2	6,67	6,67	6,67	9,33	6,67	10,67
T1	6,00	5,55	4,45	5,55	4,45	6,67
T2	6,67	7,00	6,33	6,67	7,00	8,33
Середнє	5,59	5,84	5,33	6,84	6,88	8,48

Як видно з таблиці 2, найкращі рішення тестових задач (середнє відхилення 5,33 %) були отримані при використанні оператора схрещування PMX та оператора турнірного відбору. Застосовуючи в генетичному алгоритмі оператор кросинговеру OX та турнірний відбір або відбір за правилом рулетки були отримані близькі значення середніх відхилень (5,59 % та 5,84 % відповідно).

Найгірший результат середнього відхилення 8,48 % було отримано при використанні оператора схрещування UPMX та відбору за правилом рулетки.

На рис. 2 наведено схеми упаковки прямокутників у напівнескінченну смугу, які були отримані у результаті роботи генетичного алгоритму для тестових задач J1, J2. Оптимальна довжина зайнятої смуги $L_{opt} = 15$. Обчислена довжина в обох задачах $L = 16$. Відносне відхилення обчисленої довжини зайнятої смуги від оптимальної довжини дорівнює 6,66 %.



а б

Рис. 2. Шаблони упаковки, створені при розв'язанні задач: *а*) J1, *б*) J2

Результат роботи генетичного алгоритму з використанням кросинговеру PMX та турнірного відбору для тестової задачі T1 наведено на рис. 3, де представлено графіки мінімальних та середніх значень функції пристосованості, обчислених протягом 100 ітерацій генетичного алгоритму.

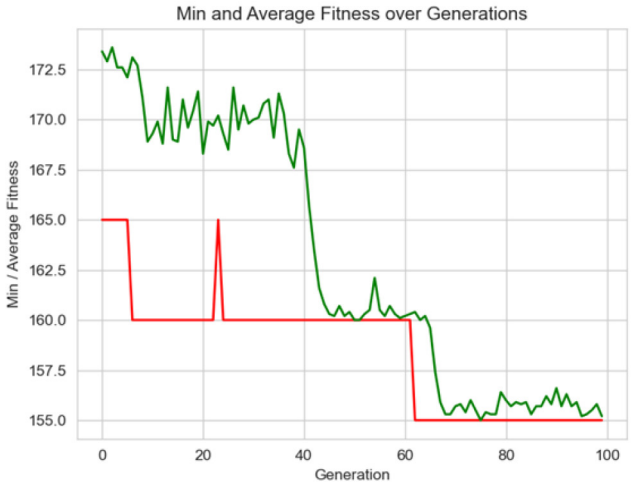


Рис. 3. Мінімальні та середні значення функції пристосованості

Схема упаковки, яка була отримана при розв'язанні задачі T1, представлена на рис. 4. Обчислена довжина $L = 155$.

Величина відносного відхилення обчисленого значення довжини зайнятої смуги від оптимальної довжини для задачі T1 становить 3,33 %.

Висновки

У дослідженні проаналізовано вплив операторів схрещування OX, PMX, UPMX та операторів турнірного відбору й відбору за правилом рулетки на ефективність роботи генетичного алгоритму при розв'язанні задачі упаковки прямокутників у напівнескінченну смугу.

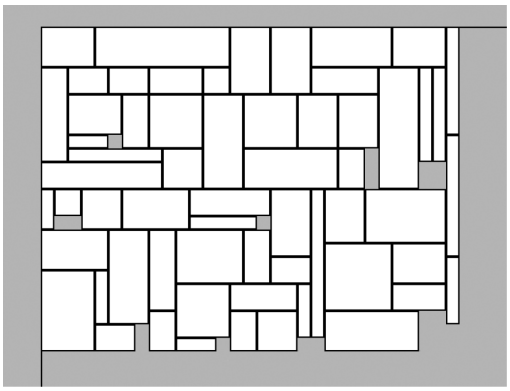


Рис. 4. Шаблон упаковки, створений при розв'язанні задачі T1

Результати досліджень показали, що використання генетичного алгоритму з оператором кросинговеру PMX та турнірним відбором дає найкращі рішення у більшості тестових задач.

Слід зазначити, що на деяких наборах тестових даних найкращий результат роботи генетичного алгоритму був отриманий при застосуванні оператора схрещування OX та турнірного відбору.

Для розв'язання задачі упаковки прямокутників у напівнескінченну смугу фіксованої ширини не рекомендується використовувати в генетичних алгоритмах оператор кросинговеру UPMX.

Список використаної літератури

1. Iori M., de Lima V. L., Martello S., Miyazawa F., Monaci M. Exact Solution Techniques for Two-dimensional Cutting and Packing. *European Journal of Operational Research*. 2020. Vol. 289(2). P. 399–415. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.06.050

2. Lodi A., Martello S., Monaci M. Two-dimensional Packing Problems: A survey. *European Journal of Operational Research*. 2002. Vol. 141(2). P. 241–252. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00123-6

3. Iori M., Martello S., Monaci M. Metaheuristic Algorithms for the Strip Packing Problem. *Optimization and Industry: New Frontiers. Applied Optimization*. 2003. Vol. 78. P. 159–179. DOI:10.1007/978-1-4613-0233-9_7

4. Jakobs S. On genetic algorithms for the packing of polygons. *European Journal of Operational Research*. 1996. Vol. 88(1). P. 165–181. https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00166-9

5. Hopper E., Turton B. C. H. An empirical investigation of meta-heuristic and heuristic algorithms for a 2D packing problem. *European Journal of Operational Research*. 2001. Vol. 128(1). P. 34–57. DOI:10.1016/S0377-2217(99)00357-4

6. Baker B. S., Coffman E. G., Rivest R. L. Orthogonal packings in two dimensions. *SIAM Journal on Computing*. 1980. Vol. 9(4). P. 846–855. DOI:10.1137/0209064

7. Liu D., Teng H. An improved BL-algorithm for genetic algorithm of the orthogonal packing of rectangles. *European Journal of Operational Research*. 1999. Vol. 112(2). P. 413–420. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00437-2

8. Chazelle B. J. The bottom-left bin-packing heuristic: an efficient implementation. *IEEE Transactions on Computers*. 1983. Vol. 32, No.8. P. 697–707. https://doi.org/10.1109/TC.1983.1676307

9. Michalewicz Z. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Berlin: Springer-Verlag. 1992. 388 p.

10. Cicirello V. A. A Survey and Analysis of Evolutionary Operators for Permutations. *Proceedings of the 15th International Joint Conference on Computational Intelligence ECTA*. 2023. Vol. 1. P. 288–299. DOI:10.5220/0012204900003595

References

1. Iori, M., de Lima, V. L., Martello, S., Miyazawa, F., & Monaci M. (2020). Exact Solution Techniques for Two-dimensional Cutting and Packing. *European Journal of Operational Research*, 289(2), 399-415. DOI:10.1016/j.ejor.2020.06.050

2. Lodi, A., Martello, S., & Monaci, M. (2002). Two-dimensional Packing Problems: A survey. *European Journal of Operational Research*, 141(2), 241–252. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00123-6

3. Iori, M., Martello, S., & Monaci, M. (2003). Metaheuristic Algorithms for the Strip Packing Problem. *Optimization and Industry: New Frontiers. Applied Optimization*, 78, 159–179. DOI:10.1007/978-1-4613-0233-9_7

4. Jakobs, S. (1996). On genetic algorithms for the packing of polygons. *European Journal of Operational Research*, 88, 165–181. https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00166-9

5. Hopper, E. & Turton, B. C. H. (2001). An empirical investigation of meta-heuristic and heuristic algorithms for a 2D packing problem. *European Journal of Operational Research*, 128, 34–57. DOI:10.1016/S0377-2217(99)00357-4

6. Baker, B. S., Coffman, E. G., & Rivest, R. L. (1980). Orthogonal packings in two dimensions. *SIAM Journal on Computing*, 9(4), 846–855. DOI:10.1137/0209064

7. Liu, D. & Teng, H. (1999). An improved BL-algorithm for genetic algorithm of the orthogonal packing of rectangles. *European Journal of Operational Research*, 112, 413–420. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00437-2

8. Chazelle, B. J. (1983). The bottomn-left bin-packing heuristic: an efficient implementation. *IEEE Transactions on Computers*, 32(8), 697–707. https://doi.org/10.1109/TC.1983.1676307

9. Michalewicz, Z. (1992). Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Berlin : Springer-Verlag.

10. Cicirello, V. A. (2023). A Survey and Analysis of Evolutionary Operators for Permutations. *Proceedings of the 15th International Joint Conference on Computational Intelligence ECTA*, 1, 288-299. DOI:10.5220/0012204900003595

УДК 004.89:336.7 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.7

Т. А. ВАКАЛЮК
доктор педагогічних наук, професор,
завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID: 0000-0001-6825-4697

Д. С. АНТОНЮК
кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри інженерії програмного забезпечення
Державний університет «Житомирська політехніка»,
докторант
Інститут цифровізації освіти
Національної академії педагогічних наук України
ORCID: 0000-0001-7496-3553

Л. А. МАРЦЕВА
доктор педагогічних наук, доцент,
професор кафедри комп'ютерної інженерії та кібербезпеки
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID: 0000-0001-5037-6565

Ю. О. ГОДЛЕВСЬКИЙ
аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID: 0000-0003-4094-0788

І. ДОВГАЛЮК
здобувач
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID: 0009-0003-5842-1502

ОГЛЯД АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ТА ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТА ОБРОБКИ ФІНАНСОВИХ ДАНИХ

У статті проаналізовано сучасні алгоритми машинного навчання та їх застосування для обробки фінансових даних, прогнозування показників та створення персоналізованих рекомендаційних систем. Досліджено ефективність різних типів алгоритмів, зокрема регресійних моделей, методів класифікації, нейронних мереж та кластеризації для вирішення специфічних фінансових завдань. Особливу увагу приділено моделям глибокого навчання, зокрема рекурентним нейронним мережам (RNN), довго-короткочасній пам'яті (LSTM) та генеративним змагальним мережам (GAN), які демонструють високу ефективність у прогнозуванні фінансових часових рядів. Розглянуто застосування штучного інтелекту в різних секторах фінансової індустрії, зокрема банківському секторі для кредитного скорингу, управлінні інвестиціями, особистих фінансах для бюджетування та корпоративних фінансах для прогнозування результатів діяльності. Проаналізовано потенціал моделей обробки природної мови, зокрема ChatGPT, для аналізу фінансових текстів та створення інтелектуальних фінансових асистентів, здатних надавати персоналізовані рекомендації в режимі природного діалогу. Виявлено ключові виклики впровадження технологій штучного інтелекту у фінансовій сфері, зокрема проблему «чорної скриньки» алгоритмів, забезпечення якості вхідних даних, дотримання регуляторних вимог та кібербезпеку. Запропоновано підходи до подолання цих викликів та окреслено перспективні напрями розвитку алгоритмів машинного навчання для фінансової сфери, включаючи інтеграцію федеративного навчання, розробку пояснюваних моделей штучного інтелекту та створення гібридних систем, що поєднують символьні та нейромережеві підходи. Дослідження демонструє, що впровадження технологій штучного інтелекту у фінансовий сектор має значний потенціал для революційних змін бізнес-процесів, підвищення ефективності аналізу даних та покращення якості обслуговування клієнтів.

Ключові слова: *машинне навчання, штучний інтелект, фінансові дані, прогнозування, нейронні мережі, глибоке навчання, рекомендаційні системи, ChatGPT, обробка природної мови, LSTM.*

T. A. VAKALIUK
Doctor of Pedagogical Sciences, Professor,
Head of the Software Engineering Department
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID: 0000-0001-6825-4697

D. S. ANTONIUK
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Software Engineering Departmentf
Zhytomyr Polytechnic State University,
Doctoral Student
Institute of Digitalisation of Education
of the National Academy of Pedagogical Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0001-7496-3553

L. A. MARTSEVA
Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Computer Engineering and Cyber Security
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID: 0000-0001-5037-6565

YU. O. HODLEVSKYI
Postgraduate Student at the Software Engineering Department
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID: 0000-0003-4094-0788

I. DOVGALIUK
Student
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID: 0009-0003-5842-1502

REVIEW OF MACHINE LEARNING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS FOR FINANCIAL DATA ANALYSIS AND PROCESSING

The article analyses modern machine learning algorithms and their application for financial data processing, forecasting indicators and creating personalised recommendation systems. The effectiveness of various types of algorithms, in particular regression models, classification methods, neural networks and clustering, for solving specific financial tasks is investigated. Particular attention is paid to deep learning models, in particular recurrent neural networks (RNN), long short-term memory (LSTM) and generative adversarial networks (GAN), which demonstrate high efficiency in forecasting financial time series. The application of artificial intelligence in various sectors of the financial industry is considered, in particular in the banking sector for credit scoring, investment management, personal finance for budgeting, and corporate finance for forecasting performance. The potential of natural language processing models, in particular ChatGPT, for analysing financial texts and creating intelligent financial assistants capable of providing personalised recommendations in a natural dialogue mode is analysed. The key challenges of implementing artificial intelligence technologies in the financial sector are identified, including the 'black box' problem of algorithms, ensuring the quality of input data, compliance with regulatory requirements, and cybersecurity. Approaches to overcoming these challenges have been proposed and promising directions for the development of machine learning algorithms for the financial sector have been outlined, including the integration of federated learning, the development of explainable artificial intelligence models, and the creation of hybrid systems that combine symbolic and neural network approaches. The study demonstrates that the introduction of artificial intelligence technologies in the financial sector has significant potential for revolutionary changes in business processes, improving data analysis efficiency, and enhancing customer service quality.

Key words: *machine learning, artificial intelligence, financial data, forecasting, neural networks, deep learning, recommendation systems, ChatGPT, natural language processing, LSTM.*

Постановка проблеми

В умовах стрімкого розвитку технологій та експоненційного зростання обсягів фінансових даних, особливо у сфері персональних фінансів, використання алгоритмів машинного навчання (ML) стає все більш актуальним для автоматизації аналізу та генерації рекомендацій. Сучасна фінансова екосистема характеризується високою волатильністю ринків, складністю взаємозв'язків між різноманітними економічними факторами та необхідністю приймати оперативні рішення на основі великих масивів даних.

Традиційні методи аналізу часто не здатні ефективно обробляти неструктуровані дані, виявляти неочевидні закономірності та адаптуватися до змін ринкових умов у режимі реального часу. Це створює нагальну потребу в розробці та впровадженні інтелектуальних систем, які б могли не лише аналізувати історичні фінансові дані, але й генерувати прогнози з високою точністю та надавати персоналізовані рекомендації.

Особливо гостро ця проблема постає в контексті персональних фінансів, де користувачі потребують зрозумілих порад щодо оптимізації витрат, формування інвестиційних стратегій та досягнення фінансових цілей. Відсутність автоматизованих систем, які б аналізували індивідуальні фінансові паттерни та надавали персоналізовані рекомендації, змушує споживачів покладатися на загальні фінансові поради, що часто не враховують їх унікальну ситуацію.

Крім того, існує значний розрив між теоретичними розробками в галузі машинного навчання та їх практичним застосуванням у фінансовій сфері. Це пов'язано з комплексом проблем, таких як забезпечення конфіденційності даних, інтерпретація результатів роботи «чорних скриньок» алгоритмів глибокого навчання, забезпечення регуляторного відповідності та необхідність інтеграції з існуючими фінансовими системами.

Таким чином, виникає необхідність систематизації та аналізу наявних алгоритмів машинного навчання для обробки фінансових даних, оцінки їх ефективності в контексті прогнозування фінансових показників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження алгоритмів машинного навчання та їх застосування у фінансовій сфері активно розвивається протягом останніх років, що підтверджується значною кількістю публікацій з цієї тематики. Зокрема, інтерес до використання штучного інтелекту для аналізу та прогнозування фінансових даних значно зріс із появою нових технологій обробки природної мови та глибокого навчання.

Основні принципи та типи машинного навчання, які можуть бути застосовані до фінансових даних, детально описані в матеріалах DataCamp [4], де представлено загальний огляд методів класифікації, регресії та кластеризації. Ці базові алгоритми становлять фундамент для більш складних фінансових аналітичних систем.

Важливим напрямом досліджень є обробка природної мови (NLP), яка дозволяє аналізувати текстові дані та новини для прогнозування фінансових показників. Як зазначається в дослідженні IBM [5], NLP відіграє ключову роль у аналізі настроїв ринку та виявленні трендів через опрацювання текстової інформації.

Глибоке навчання, як підрозділ машинного навчання, описане в матеріалах GeeksforGeeks [6], має особливе значення для прогнозування фінансових показників завдяки здатності виявляти складні нелінійні залежності в даних.

У [2] досліджують використання штучного інтелекту у сфері фінансових послуг, виділяючи основні напрямки застосування ШІ та його вплив на трансформацію фінансового сектору.

Питання практичного застосування ШІ у фінансовій галузі детально розглядається в матеріалах Google Cloud [8], де описуються конкретні кейси використання штучного інтелекту для автоматизації фінансових процесів, управління ризиками та виявлення шахрайства.

Deloitte [9] і Builtin [10] представляють комплексні огляди трансформації фінансової індустрії під впливом штучного інтелекту, наводячи численні приклади успішного впровадження ШІ у банківській справі, страхуванні та інвестиційному менеджменті.

Регуляторні аспекти використання ШІ у фінансовій сфері висвітлюються в дослідженні, представленому в джерелі [11], де аналізуються виклики та можливості, пов'язані з регулюванням технологій ШІ, а також майбутні тренди в цій галузі.

Особливу увагу дослідники приділяють персоналізованим фінансовим рекомендаціям на основі ШІ. У дослідженні [12] розглядається потенціал використання штучного інтелекту як персонального фінансового консультанта, що здатен надавати індивідуальні поради на основі аналізу фінансової поведінки користувача.

Шуригін К.А. та Зіноватна С.Л. [13] аналізують рекомендаційні системи для прийняття фінансових рішень з використанням штучного інтелекту, демонструючи, як алгоритми ШІ можуть допомагати користувачам оптимізувати свої фінансові стратегії.

Котлярова Ю. [14] досліджує методи, моделі та алгоритми персоналізації для розробки рекомендаційних систем, що має безпосереднє застосування до створення фінансових рекомендаційних сервісів, здатних адаптуватися до індивідуальних потреб користувачів.

Основні технічні аспекти розробки та інтеграції ШІ-систем розглядаються в документації OpenAI [1] та матеріалах Educative [3], де представлені практичні підходи до імплементації API ChatGPT та інших інструментів штучного інтелекту в фінансові сервіси.

Формулювання мети дослідження

Метою цього дослідження є систематизація та аналіз сучасних алгоритмів і технологій машинного навчання, які застосовуються для обробки фінансових даних.

Викладення основного матеріалу дослідження

Алгоритми машинного навчання є потужним інструментом для аналізу великих обсягів фінансових даних, таких як операції користувачів, їх витрати, доходи, заощадження та інвестиції. Використання алгоритмів

машинного навчання дозволяє виявляти тренди, залежності та аномалії в цих даних, що дає змогу створювати персоналізовані рекомендації для користувачів.

Одним із ключових підходів у машинному навчанні є регресія. Алгоритми регресії, зокрема лінійна та логістична регресія, широко застосовуються для прогнозування фінансових показників, таких як ціна акцій, доходи користувачів або рівень заощаджень на основі історичних даних.

Класифікація є ще одним важливим напрямом, який дозволяє категоризувати фінансові дані. Fналізуючи поведінку користувачів, можна класифікувати операції як «нормальні» або «підозрілі». Це особливо ефективно для виявлення можливого шахрайства.

Алгоритми кластеризації, зокрема методи k-середніх або ієрархічної кластеризації, допомагають групувати користувачів за схожістю їх фінансових звичок. Такий підхід є корисним для створення персоналізованих пропозицій або формування профілів користувачів на основі їх фінансової активності.

Нарешті, алгоритми рекомендаторів є важливою складовою фінансових технологій. Вони використовуються для аналізу фінансових даних користувачів та пропонування інвестиційних можливостей, стратегій заощаджень або рекомендацій щодо оптимізації витрат, що робить фінансові сервіси більш зручними та ефективними.

Прогнозування фінансових показників є однією з ключових задач у сфері фінансового менеджменту та аналізу. Завдяки сучасним технологіям штучного інтелекту (AI) цей процес стає значно ефективнішим, точнішим і більш автоматизованим. Використання AI дозволяє аналізувати великі масиви даних, враховувати складні взаємозв'язки між змінними та будувати прогностичні моделі, які адаптуються до змін зовнішнього середовища в реальному часі.

Основні підходи до прогнозування за допомогою AI базуються на алгоритмах машинного навчання (Machine Learning, ML), глибокого навчання (Deep Learning) та аналізу великих даних (Big Data Analytics). Методи прогнозування, застосовувані у фінансовій сфері, включають різноманітні алгоритми, які допомагають точно оцінити майбутні фінансові показники.

Регресійні алгоритми використовуються для прогнозування кількісних показників, таких як дохід, обсяг продажів чи вартість акцій. У фінансовій сфері найбільш популярними є кілька типів моделей. Лінійна регресія (Linear Regression) застосовується для базових прогнозів і є одним із найпростіших методів аналізу. Регресія на основі дерев рішень (Decision Tree Regression) ефективно обробляє дані зі складними нелінійними взаємозв'язками, що робить її корисною у випадках, коли взаємозалежність між показниками не є очевидною. Ще однією потужною моделлю є регресія на основі градієнтного бустингу (Gradient Boosting Regression), яка забезпечує високу точність прогнозів завдяки оптимізації моделі через послідовне навчання.

Нейронні мережі вважаються одним із найефективніших інструментів для прогнозування складних фінансових показників. Зокрема, вони використовуються для прогнозування динаміки цін акцій. Рекурентні нейронні мережі (RNN) і довго-короткочасна пам'ять (LSTM) спеціалізуються на аналізі часових рядів, що дозволяє будувати точні прогнози на основі історичних даних. У сфері аналізу ризиків глибокі нейронні мережі демонструють високу ефективність, моделюючи складні взаємозв'язки між різними факторами ризику, що є важливим для страхових компаній і управління портфелями активів.

Крім того, нейронні мережі активно застосовуються для аналізу настроїв ринку. Використання технологій обробки природної мови (NLP) разом із нейронними мережами дозволяє аналізувати великі обсяги текстових даних, таких як новини чи дописи в соціальних мережах, для визначення ринкових тенденцій та можливих змін у поведінці інвесторів.

Генеративно-змагальні мережі (GAN) або варіаційні автокодери (VAE) використовуються для моделювання складних фінансових сценаріїв. Вони дозволяють створювати симуляції можливих варіантів розвитку подій, наприклад, у прогнозуванні доходів чи витрат компанії за різних ринкових умов.

Методи на основі ансамблевого навчання використовують алгоритми, такі як Random Forest чи XGBoost, які поєднують декілька моделей для отримання узагальненого прогнозу. Це підвищує точність і стабільність прогнозів, особливо в умовах високої волатильності фінансових ринків.

Штучний інтелект знаходить широке застосування у прогнозуванні фінансових показників у різних секторах завдяки своїй здатності аналізувати великі обсяги даних, враховувати різноманітні фактори та будувати високоточні прогностичні моделі. У банківському секторі AI використовується для оцінки кредитоспроможності клієнтів через створення кредитного скорингу, що дозволяє передбачити ймовірність дефолту на основі історії платежів, доходів, витрат та інших фінансових характеристик. Крім того, банки активно застосовують AI для прогнозування прибутковості своїх продуктів, таких як депозити, кредити чи страхові поліси, що допомагає визначати найефективніші стратегії для залучення клієнтів та управління фінансами.

У сфері управління інвестиціями AI забезпечує можливість формування оптимальних інвестиційних портфелів шляхом аналізу ризиків та прогнозування прибутковості різних активів. Інвестиційні компанії також активно впроваджують алгоритми AI для автоматизованої торгівлі на фінансових ринках, що дозволяє реагувати на зміни ринкових умов у реальному часі та мінімізувати людські помилки.

У додатках для управління особистими фінансами (PFM) AI використовується для аналізу фінансових звичок користувачів, прогнозування майбутніх витрат і доходів, а також для створення персоналізованих рекомендацій

із бюджетування та економії коштів. Такі інструменти допомагають користувачам краще розуміти свої фінансові можливості, оптимізувати витрати та уникати надмірних боргів.

У корпоративному секторі AI відіграє важливу роль у прогнозуванні фінансових результатів компаній, допомагаючи передбачати майбутні доходи, витрати та прибуток на основі аналізу історичних даних, ринкових тенденцій та змін у бізнес-середовищі. Алгоритми AI також застосовуються для ідентифікації фінансових ризиків, моделювання можливих сценаріїв розвитку подій та створення стратегій їх мінімізації.

Загалом, впровадження AI у фінансову сферу трансформує підходи до прогнозування, роблячи їх більш точними, адаптивними та персоналізованими. Це дозволяє значно підвищити ефективність управління фінансовими ресурсами як для окремих користувачів, так і для великих організацій.

Штучний інтелект має численні переваги в контексті фінансового прогнозування. Одна з них – це підвищена точність. AI здатний аналізувати величезні обсяги даних, виявляючи складні залежності та закономірності, які залишаються непоміченими при використанні традиційних методів. Це дозволяє створювати більш точні прогнози, що враховують широкий спектр змінних, від ринкових тенденцій до індивідуальної поведінки клієнтів.

Іншою перевагою є висока швидкість обробки даних. Алгоритми AI обробляють інформацію в реальному часі, що є особливо важливим у динамічних умовах фінансового ринку. Це забезпечує оперативну реакцію на зміни ринкової ситуації та дозволяє приймати своєчасні рішення, що може мати значний вплив на ефективність діяльності.

AI також має здатність до адаптації та самонавчання. Моделі AI можуть автоматично коригувати свої прогнози, адаптуючись до змін у ринковому середовищі на основі нових даних. Це особливо корисно в умовах нестабільності, де швидкість і точність аналізу є вирішальними факторами для успішного прогнозування.

І, нарешті, використання AI дозволяє значно заощаджувати ресурси. Впровадження штучного інтелекту в процеси фінансового прогнозування зменшує витрати на аналітику, а також мінімізує залежність від людського фактору, знижуючи ризик помилок, пов’язаних з людським втручанням.

Окрім численних переваг, використання алгоритмів машинного навчання та глибокого навчання для прогнозування фінансових показників супроводжується й певними викликами. Це включає складність налаштування моделей, потребу в обробці великих обсягів даних та ризик переобучення моделей, що може знижувати точність прогнозів. Одним з основних викликів є також забезпечення інтерпретованості результатів, що критично важливо для прийняття обґрунтованих рішень у фінансовій сфері.

Одним з основних викликів впровадження AI є необхідність наявності якісних та структурованих даних. Для того, щоб моделі AI працювали ефективно, потрібні великі обсяги актуальних та добре організованих даних. Коли таких даних немає або вони погано підготовлені, точність прогнозів значно знижується, що негативно позначається на результатах використання технологій AI в фінансових прогнозах. Ще однією проблемою є так звана «чорна скринька» алгоритмів глибокого навчання, які дуже складно інтерпретувати. Це особливо стосується моделей, які активно використовуються для прогнозування в фінансах. Через складність пояснення, як саме алгоритм прийшов до певного рішення, виникає недовіра з боку як користувачів, так і регуляторів. Не менш важливими є питання етики та права, адже алгоритми можуть мати приховану упередженість. Це може статися через недосконалі дані або неправильні налаштування моделей, що призводить до дискримінації або порушення прав клієнтів. Крім того, важливо забезпечити прозорість прийняття рішень, щоб відповідати нормативним вимогам і уникати юридичних проблем. Витрати на впровадження AI також створюють певні перешкоди. Розробка і підтримка ефективних моделей потребує значних фінансових та технічних ресурсів. Це стає проблемою для малих та середніх підприємств, які часто не мають достатніх можливостей для таких великих інвестицій. З огляду на використання AI для обробки чутливих фінансових даних, варто зазначити ризики, пов’язані з кібербезпекою. Викрадення або зловживання конфіденційною інформацією є серйозною загрозою для компаній, які інтегрують AI у свою діяльність. Захист таких даних є критично важливим для забезпечення безпеки і довіри користувачів.

ChatGPT є потужною мовною моделлю, створеною на основі глибокого навчання (Deep Learning). Вона належить до категорії технологій обробки природної мови (Natural Language Processing, NLP) і генерації тексту. Завдяки своїм можливостям ChatGPT також може виконувати функції системи рекомендацій, аналізуючи дані та надаючи індивідуальні поради. Це робить модель універсальним інструментом, здатним працювати з різноманітними завданнями у фінансовій сфері.

Однією з ключових функцій ChatGPT є його здатність виконувати роль NLP-моделі для фінансового аналізу. Модель може аналізувати текстову інформацію, інтерпретуючи запити користувачів і генеруючи персоналізовані рекомендації. Наприклад, користувач може запитати про стан своїх фінансів, попросити поради щодо оптимізації витрат або дізнатися про кращі стратегії заощаджень. ChatGPT здатний працювати з великими обсягами фінансових даних і надавати відповіді, що базуються на їх глибокому аналізі.

Інтеграція ChatGPT у системи рекомендацій є ще однією важливою можливістю моделі. Вона може аналізувати витрати користувачів, порівнюючи їх із середніми показниками в певних категоріях або групах, і пропонувати конкретні рішення для економії коштів або покращення фінансового стану. Наприклад, модель може вказати, в яких сферах користувач витрачає більше, ніж середній показник, і запропонувати оптимізувати ці витрати.

Глибокі нейронні мережі, що лежать в основі ChatGPT, дозволяють їй працювати з великими масивами даних і виявляти складні залежності в текстовій інформації. Завдяки глибокому навчанню модель здатна обробляти складні фінансові дані, розпізнавати патерни в поведінці користувачів і пропонувати рішення, які базуються на цих даних. Наприклад, ChatGPT може ідентифікувати тенденції у витратах користувача або визначити оптимальні інвестиційні стратегії на основі історичних даних.

Таким чином, ChatGPT є не лише інструментом для обробки текстових запитів, а й потужною платформою для фінансового аналізу та створення персоналізованих рекомендацій. Це відкриває широкі можливості для його використання в фінансових технологіях, автоматизації клієнтських сервісів і оптимізації управління фінансами. Використовуючи ChatGPT для аналізу фінансових даних, можна вирішувати низку завдань, що значно спрощують управління фінансами та підвищують ефективність роботи.

Одним із ключових завдань є автоматичне прогнозування фінансових результатів. Модель на основі історичних даних про доходи та витрати користувачів здатна створювати точні прогнози щодо їх фінансового стану на найближчий період. Це дозволяє користувачам приймати обґрунтовані рішення щодо планування бюджету та управління ресурсами. Також ChatGPT може надавати персоналізовані фінансові поради. Завдяки аналізу запитів користувачів, модель пропонує рекомендації з оптимізації витрат, інвестування або збереження фінансів. Ці поради адаптуються до конкретної фінансової ситуації кожного користувача, що робить їх надзвичайно корисними в індивідуальному плануванні.

Ще однією важливою функцією є аналіз фінансових звітів. ChatGPT допомагає користувачам розуміти складні фінансові документи, пояснюючи незрозумілі терміни та роз'яснюючи значення різних показників. Це значно полегшує роботу з фінансовими звітами для нефахівців у цій сфері.

Окрім цього, модель здатна виявляти аномалії та шахрайські дії у фінансових транзакціях. На основі аналізу транзакцій користувачів ChatGPT може ідентифікувати підозрілі або незвичні дії. Це є важливим елементом забезпечення фінансової безпеки, адже дозволяє оперативно реагувати на можливі загрози.

Одним із найбільш значущих аспектів використання ChatGPT є його інтеграція у систему рекомендацій. У цьому контексті модель виступає як потужний інструмент для генерування рекомендацій на основі аналізу фінансових даних. Завдяки здатності обробляти великий обсяг інформації, ChatGPT може використовувати дані про фінансові звички користувача, його доходи та витрати для створення персоналізованих рекомендацій.

Наприклад, ChatGPT може аналізувати регулярні витрати користувача та пропонувати способи оптимізації витрат. Це дозволяє визначати найефективніші стратегії економії коштів без значного впливу на якість життя.

Крім цього, модель здатна генерувати рекомендації щодо інвестиційних стратегій, які найкраще відповідають фінансовому профілю користувача. Це допомагає ухвалювати обґрунтовані рішення щодо управління капіталом і досягнення фінансової стабільності.

Ще однією важливою функцією є допомога у досягненні фінансових цілей. Наприклад, ChatGPT може підказати, як заощадити на покупку будинку, покращити рейтинг кредитної історії чи досягти іншої фінансової мети.

Окрім рекомендацій, ChatGPT забезпечує ефективну комунікацію з користувачем. Він надає інтерфейс, у якому користувач може ставити запитання та отримувати зрозумілі, чіткі та доступні відповіді. Це робить взаємодію з фінансовими даними зручною та продуктивною навіть для нефахівців.

Однією з ключових переваг є персоналізація. ChatGPT здатний враховувати індивідуальні особливості кожного користувача, аналізуючи його фінансові потреби та ситуацію. Завдяки цьому модель надає рекомендації, які максимально відповідають конкретним умовам і цілям користувача.

Ще однією важливою перевагою є можливість взаємодії через інтерфейс. Користувачі можуть ставити текстові запити, не використовуючи складної термінології чи спеціальних команд. Це робить систему зручною та інтуїтивно зрозумілою навіть для тих, хто не має глибоких знань у фінансовій сфері. Окрім того, ChatGPT забезпечує високу швидкість і ефективність роботи. Модель може оперативно обробляти великі обсяги даних і генерувати актуальні фінансові рекомендації. Це дозволяє користувачам отримувати необхідну інформацію та поради в максимально короткі строки, що є особливо важливим у динамічному фінансовому середовищі.

Висновки

У результаті проведеного дослідження було проаналізовано основні алгоритми машинного навчання, що застосовуються для обробки фінансових даних, зокрема регресійні моделі, алгоритми класифікації, нейронні мережі та методи кластеризації, які дозволяють ефективно аналізувати великі обсяги даних, визначати фінансові патерни та надавати рекомендації. Встановлено, що для успішного прогнозування фінансових показників особливо ефективними є комбіновані підходи, що поєднують різні типи алгоритмів.

Детально розглянуто застосування штучного інтелекту для прогнозування фінансових результатів та вартості активів. Показано, що алгоритми машинного навчання можуть бути використані для побудови точних моделей прогнозування на основі історичних даних, особливо для завдань оцінки кредитоспроможності, прогнозування цін активів та аналізу фінансових ризиків. При цьому найвищу ефективність демонструють моделі на основі LSTM, GAN, які здатні виявляти складні нелінійні залежності в часових рядах.

Проведене дослідження також виявило перспективні напрями подальшого розвитку алгоритмів машинного навчання для фінансової сфери, зокрема розробку пояснюваних моделей штучного інтелекту, створення гібридних систем, що поєднують символьні та нейромережеві підходи.

Список використаної літератури

1. OpenAI developer platform. URL: https://platform.openai.com/docs/overview.
2. Solovii Kh., Horodyska N. Using of artificial intelligence in the field of financial services. III International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students 'Philosophical Dimensions of Technology' (PDT-2022). Pp. 87–89. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/39709/2/PDT_2022_Solovii_Kh-Using_of_artificial_intelligence_87-89.pdf
3. How to use ChatGPT API in php. URL: https://www.educative.io/answers/how-to-use-chatgpt-api-in-php
4. What is machine learning? Definition, Types, Tools & More. URL: https://www.datacamp.com/blog/what-is-machine-learning
5. What is NLP (natural language processing)? URL: https://www.ibm.com/think/topics/natural-language-processing
6. Introduction to Deep Learning. URL: https://www.geeksforgeeks.org/introduction-deep-learning/
7. What is computer vision? URL: https://www.ibm.com/think/topics/computer-vision
8. What is artificial intelligence (AI) in finance? URL: https://cloud.google.com/discover/finance-ai
9. How Artificial Intelligence is Transforming the Financial Services Industry. URL: https://www.deloitte.com/ng/en/services/risk-advisory/services/how-artificial-intelligence-is-transforming-the-financial-services-industry.html
10. 21 Examples if AI in Finance. URL: https://builtin.com/artificial-intelligence/ai-finance-banking-applications-companies
11. Naqvi, H. A. Artificial Intelligence in Finance: Challenges, Opportunities and Regulatory Developments. 2022. Springer Publishing. URL: https://www.amazon.com/Artificial-Intelligence-Finance-Opportunities-Developments/dp/1803926163?utm_source=chatgpt.com
12. Liu, Zechen. Artificial Intelligence as Personal Financial Advisor in the Future? – A Case Study Based on Algorithmic Innovation Strategies. Advances in Economics, Management and Political Sciences. 87. 2024. Pp. 272–278. 10.54254/2754-1169/87/20241030
13. Shuryhin K. A., Zinovatna S. L. Recommendation system for financial decision-making using Artificial intelligence. Applied Aspects of Information Technology. 2024; Vol. 7, No. 4: 348–358. DOI: 10.15276/aait.07.2024.24
14. Yuliia Kotliarova. Analysis of methods, models and algorithms of personalization for the recommender systems development. Scientific Journal "ScienceRise", Vol. 12, 2018. P. 19–29. DOI: 10.15587/2313-8416.2018.152949

References

1. OpenAI. (2024). OpenAI developer platform. https://platform.openai.com/docs/overview
2. Solovii, K., & Horodyska, N. (2022). Using of artificial intelligence in the field of financial services. III International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students 'Philosophical Dimensions of Technology' (PDT-2022), 87–89. https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/39709/2/PDT_2022_Solovii_Kh-Using_of_artificial_intelligence_87-89.pdf
3. Educative. (2023). How to use ChatGPT API in php. https://www.educative.io/answers/how-to-use-chatgpt-api-in-php
4. DataCamp. (2024). What is machine learning? Definition, Types, Tools & More. https://www.datacamp.com/blog/what-is-machine-learning
5. IBM. (2024). What is NLP (natural language processing)? https://www.ibm.com/think/topics/natural-language-processing
6. GeeksforGeeks. (2023). Introduction to Deep Learning. https://www.geeksforgeeks.org/introduction-deep-learning/
7. IBM. (2024). What is computer vision? https://www.ibm.com/think/topics/computer-vision
8. Google Cloud. (2024). What is artificial intelligence (AI) in finance? https://cloud.google.com/discover/finance-ai
9. Deloitte. (2023). How Artificial Intelligence is Transforming the Financial Services Industry. https://www.deloitte.com/ng/en/services/risk-advisory/services/how-artificial-intelligence-is-transforming-the-financial-services-industry.html
10. Builtin. (2024). 21 Examples of AI in Finance. https://builtin.com/artificial-intelligence/ai-finance-banking-applications-companies
11. Naqvi, H. A. (2022). Artificial Intelligence in Finance: Challenges, Opportunities and Regulatory Developments. Springer Publishing.
12. Liu, Z. (2024). Artificial Intelligence as Personal Financial Advisor in the Future? – A Case Study Based on Algorithmic Innovation Strategies. Advances in Economics, Management and Political Sciences, 87, 272–278. https://doi.org/10.54254/2754-1169/87/20241030
13. Shuryhin, K. A., & Zinovatna, S. L. (2024). Recommendation system for financial decision-making using Artificial intelligence. Applied Aspects of Information Technology, 7(4), 348–358. https://doi.org/10.15276/aait.07.2024.24
14. Kotliarova, Y. (2018). Analysis of methods, models and algorithms of personalization for the recommender systems development. Scientific Journal "ScienceRise", 12, 19–29. https://doi.org/10.15587/2313-8416.2018.152949

УДК 004.932.2:004.8 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.8

Т. А. ВАКАЛЮК
доктор педагогічних наук, професор,
завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID: 0000-0001-6825-4697

Д. В. ФУРІХАТА
старший викладач кафедри комп'ютерних наук
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID: 0000-0002-6093-664X

В. М. ЯНЧУК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри робототехніки, електроенергетики
та автоматизації ім. проф. Б. Б. Самотокіна
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID: 0000-0002-6715-4667

Н. В. ЛЕУТ
студент
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID: 0009-0009-4317-0898

РОЗРОБКА ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕЛІ РОЗПІЗНАВАННЯ РУКОПИСНОГО ТЕКСТУ НА ОСНОВІ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Стаття присвячена розробці та оцінці ефективності моделі розпізнавання рукописного тексту на основі згорткових нейронних мереж з використанням набору даних IAM Sentences. В роботі детально розглянуто процес створення моделі, яка поєднує сучасні методи глибокого навчання для вирішення складної задачі перетворення рукописної інформації в цифровий формат. Проведено комплексний аналіз наукових досліджень у галузі розпізнавання тексту, що підтверджує актуальність застосування нейронних мереж.

Методологія дослідження включає детальну попередню обробку набору даних IAM Sentences, що містить зображення рукописних речень з відповідними текстовими мітками. Описано процес підготовки даних, включаючи читання метаданих, фільтрацію помилкових записів, нормалізацію зображень та створення словника унікальних символів. Особливу увагу приділено методам доповнення даних з використанням випадкових змін яскравості, масштабування для підвищення стійкості моделі.

Архітектура розробленої моделі базується на поєднанні згорткових шарів для виділення просторових ознак зображень та LSTM-шарів для захоплення послідовних залежностей між символами. Використання функції втрат Connectionist Temporal Classification (CTC) дозволяє моделі прогнозувати послідовності символів без явного вирівнювання між входом та виходом, що є критично важливим для обробки рукописного тексту змінної довжини.

Результати експериментів демонструють високу ефективність розробленої системи з досягненням CER на рівні 11.04 % після навчання протягом 67 епох. Цей показник свідчить про високу точність розпізнавання символів, що є конкурентоспроможним результатом для задач розпізнавання рукописного тексту. Аналіз кривих навчання через TensorBoard показав стабільне покращення метрик з незначними флуктуаціями, що підтверджує коректність обраної архітектури та параметрів навчання.

Ключові слова: *розпізнавання рукописного тексту, згорткові нейронні мережі, LSTM, глибоке навчання, обробка зображень, набір даних IAM Sentences, TensorFlow.*

T. A. VAKALIUK
Doctor of Pedagogical Sciences, Professor,
Head of the Department of Software Engineering
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID: 0000-0001-6825-4697

D. V. FURIKHATA
Senior Lecturer at the Department of Computer Science
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID: 0000-0002-6093-664X

V. M. YANCHUK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Robotics, Electrical Engineering
and Automation named after Prof. B. B. Samotokin
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID: 0000-0002-6715-4667

N. V. LEUT
Student
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID: 0009-0009-4317-0898

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF A HANDWRITTEN TEXT RECOGNITION MODEL BASED ON CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

The article is devoted to developing and evaluating the effectiveness of a handwritten text recognition model based on convolutional neural networks using the IAM Sentences dataset. The paper details the process of creating a model that combines modern deep learning methods to solve the complex task of converting handwritten information into digital format. A comprehensive analysis of scientific research in text recognition confirms the relevance of neural networks.

The research methodology includes detailed pre-processing of the IAM Sentences dataset, which contains images of handwritten sentences with corresponding text labels. The data preparation includes metadata reading, filtering of false entries, image normalisation, and creating a dictionary of unique characters. Particular attention is paid to data augmentation methods using random brightness changes and scaling to improve model robustness.

The architecture of the developed model is based on a combination of convolutional layers to extract spatial features from images and LSTM layers to capture sequential dependencies between characters. The Connectionist Temporal Classification (CTC) loss function allows the model to predict symbol sequences without explicit alignment between input and output, critical for processing variable-length handwritten text.

The experiments' results demonstrate the developed system's high efficiency, achieving a CER of 11.04 % after training for 67 epochs. This indicator shows high character recognition accuracy, a competitive result for handwritten text recognition tasks. Analysis of the training curves via TensorBoard showed a steady improvement in metrics with minor fluctuations, confirming the correctness of the chosen architecture and training parameters.

Key words: *handwritten text recognition, convolutional neural networks, LSTM, deep learning, image processing, IAM Sentences dataset, TensorFlow.*

Постановка проблеми

В сучасному цифровому світі зростає потреба в автоматизації процесів обробки рукописної інформації. Незважаючи на широке поширення цифрових технологій, рукописний текст залишається важливим джерелом інформації в освіті, медицині, юриспруденції та багатьох інших галузях. Однак процес перетворення рукописного тексту в цифровий формат досі залишається трудомістким і часозатратним завданням.

Традиційні методи оптичного розпізнавання символів (OCR) демонструють високу ефективність при роботі з друкованим текстом, проте їх застосування для розпізнавання рукописного тексту обмежене через значну варіативність почерків, різноманітність стилів написання, нечіткість символів та можливі спотворення зображень. Ці фактори призводять до низької точності розпізнавання та високого відсотка помилок.

Існуючі системи розпізнавання рукописного тексту часто потребують значних обчислювальних ресурсів, складного налаштування та не завжди забезпечують прийнятну точність для практичного використання. Крім того, більшість комерційних рішень є дорогими та не адаптованими для специфічних потреб користувачів.

Сучасні досягнення в галузі глибокого навчання, зокрема застосування згорткових нейронних мереж та архітектур LSTM, відкривають нові можливості для вирішення задач розпізнавання рукописного тексту. Однак питання оптимального поєднання цих технологій, вибору відповідного набору даних для навчання та досягнення високої точності розпізнавання при збереженні ефективності обчислень залишається актуальним.

Таким чином, існує потреба в розробці ефективної системи розпізнавання рукописного тексту, яка б поєднувала сучасні методи глибокого навчання з практичними вимогами до точності та швидкості обробки інформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз літератури демонструє активний розвиток технологій розпізнавання рукописного тексту з використанням методів глибокого навчання. Дослідження в цій галузі зосереджуються на удосконаленні архітектур нейронних мереж та підвищенні точності розпізнавання.

Nebauer [8] досліджував застосування згорткових нейронних мереж для візуального розпізнавання. Автор проаналізував ефективність CNN у задачах комп'ютерного зору та встановив, що згорткові шари здатні ефективно виділяти локальні ознаки зображень, що є критично важливим для розпізнавання символів. Дослідження показало, що архітектура CNN забезпечує інваріантність до зсувів та деформацій, що особливо актуально для обробки рукописного тексту з його природною варіативністю.

Yamashita та ін. [9] представили комплексний огляд згорткових нейронних мереж та їх застосування в радіології, що розширює розуміння можливостей CNN у медичних застосуваннях. Автори детально проаналізували архітектурні особливості CNN та продемонстрували їх ефективність у обробці медичних зображень. Особливо важливим є висновок про здатність глибоких згорткових мереж автоматично виучувати ієрархічні представлення даних, що дозволяє виділяти як низькорівневі, так і високорівневі ознаки зображень. Це дослідження підкреслює універсальність CNN для різних доменів візуального розпізнавання.

Mienye, Swart та Obaido [10] опублікували актуальний огляд рекурентних нейронних мереж, їх архітектур, варіантів та застосувань. Автори систематично проаналізували розвиток RNN-технологій, включаючи LSTM та GRU архітектури, та їх ефективність у обробці послідовних даних. Дослідження підкреслює важливість LSTM-шарів для захоплення довгострокових залежностей у послідовностях, що є критично важливим для розпізнавання тексту, де контекст між символами впливає на точність розпізнавання. Автори також розглянули сучасні тенденції в комбінуванні RNN з іншими архітектурами для покращення продуктивності.

Аналіз літератури показує, що поєднання згорткових та рекурентних архітектур є перспективним напрямком для розпізнавання рукописного тексту. Згорткові шари забезпечують ефективне виділення просторових ознак, тоді як LSTM-компоненти дозволяють моделювати послідовні залежності між символами. Однак існує потреба в подальшому дослідженні оптимальних конфігурацій таких гібридних архітектур та методів їх навчання для досягнення максимальної точності розпізнавання.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є розробка та оцінка ефективності системи розпізнавання рукописного тексту на основі згорткових нейронних мереж з використанням набору даних IAM Sentences.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для розробки системи розпізнавання рукописного тексту було використано набір даних IAM Sentences [1], який містить зображення тексту речень, написаних від руки, з відповідними текстовими мітками. Цей набір даних є доволі популярним у галузі і перевірений часом, часто використовується для оцінки ефективності моделей розпізнавання тексту.

Перед початком навчання моделі необхідно провести аналіз та попередню обробку даних. Кожен зразок у цьому наборі даних складається із зображення рукописного тексту та відповідного зображенню рядка тексту. Файл sentences.txt містить метадані для кожного зразка зображення в наборі даних, включаючи шлях до файлу зображення та відповідну текстову мітку (рис. 1).

Створимо змінні dataset, кожен елемент якого міститиме шлях до файлу зображення та текстову мітку, що дозволяє легко звертатися до даних під час навчання моделі, vocab – набір, що міститиме унікальні символи міток та max_length – найбільшу довжину міток:

```
dataset, vocab, max_length = [], set(), 0
```

Розглянемо кожен рядок файлу sentences.txt. Якщо рядок починається з «#» – пропускаємо його:

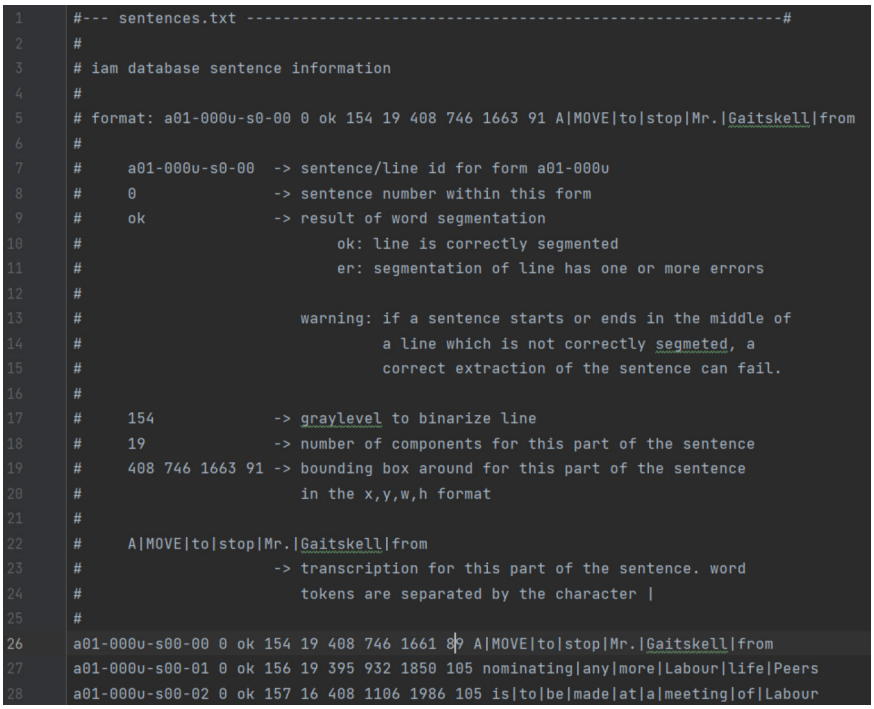
```
words = open(sentences_txt_path, "r").readlines()
for line in tqdm(words):
   if line.startswith("#"):
      continue
```

Після цього отримуємо елементи рядка розділені пробілами та розглядаємо далі, якщо третій елемент не «err» (в наборі помічені дані):

```
line_split = line.split(" ")
if line_split[2] == "err":
   continue
```

Отримуємо назву файлів, взявши перший елемент рядка:

```
file_name = line_split[0] + ".png"
```



```
#--- sentences.txt ----------------------------------------------------------#
#
# iam database sentence information
#
# format: a01-000u-s0-00 0 ok 154 19 408 746 1663 91 A|MOVE|to|stop|Mr.|Gaitskell|from
#
#     a01-000u-s0-00  -> sentence/line id for form a01-000u
#     0               -> sentence number within this form
#     ok              -> result of word segmentation
#                            ok: line is correctly segmented
#                            er: segmentation of line has one or more errors
#
#                        warning: if a sentence starts or ends in the middle of
#                                 a line which is not correctly segmeted, a
#                                 correct extraction of the sentence can fail.
#
#     154             -> graylevel to binarize line
#     19              -> number of components for this part of the sentence
#     408 746 1663 91 -> bounding box around for this part of the sentence
#                        in the x,y,w,h format
#
#     A|MOVE|to|stop|Mr.|Gaitskell|from
#                     -> transcription for this part of the sentence. word
#                        tokens are separated by the character |
#
a01-000u-s00-00 0 ok 154 19 408 746 1661 89 A|MOVE|to|stop|Mr.|Gaitskell|from
a01-000u-s00-01 0 ok 156 19 395 932 1850 105 nominating|any|more|Labour|life|Peers
a01-000u-s00-02 0 ok 157 16 408 1106 1986 105 is|to|be|made|at|a|meeting|of|Labour
```

Рис. 1. Структура набору даних

Замінимо всі символи «|» на пробіли, для отримання тексту рядків:

```
label = line_split[-1].rstrip("\n").replace("|", " ")
```

Створюємо змінну шляху до файлу. Якщо шляху до файлу не існує – пропускаємо цей рядок:

```
rel_path = os.path.join(sentences_folder_path, file_name)
if not os.path.exists(rel_path):
   print(f"Файл не знайдено: {rel_path}")
   continue
```

Якщо такий шлях є – додаємо шлях до dataset та мітку до списку наборів даних, оновлюємо змінну vocab символами з мітки та присвоюємо max_length максимальне значення між поточним значенням змінної та довжиною мітки:

```
dataset.append([rel_path, label])
vocab.update(list(label))
max_length = max(max_length, len(label))
```

Для навчання моделі необхідно мати набір усіх унікальних символів, які зустрічаються у текстових мітках, що дозволяє моделі працювати з обмеженим набором символів і спрощує процес навчання. Максимальна довжина мітки використовується для фіксування розміру вихідного масиву, що генерується моделлю і потрібна для коректної роботи алгоритму Connectionist Temporal Classification.

Після попередньої обробки даних наступним кроком є створення та навчання моделі розпізнавання рукописного тексту. Спершу заповнимо конфігураційний файл configs.py та створимо об'єкт ModelConfigs на його основі для зберігання конфігурацій моделі, задамо словник vocab і максимальну довжину max_length тексту як атрибути цього об'єкта. Цей конфігураційний файл знадобиться при запуску виведення на навченій моделі:

```
configs = ModelConfigs()
configs.vocab = "".join(sorted(vocab))
configs.max_text_length = max_length
configs.save()
```

Потім розділимо набір даних у співвідношенні 90 % для навчання і 10 % для перевірки.

```
data_df = pd.DataFrame(dataset, columns=["image_path", "label"])
train_df, val_df = train_test_split(data_df, test_size=0.2, random_state=42)
train_df.to_csv(os.path.join(configs.model_path, "train.csv"), index=False)
val_df.to_csv(os.path.join(configs.model_path, "val.csv"), index=False)
```

Крім цього, створимо об’єкти, застосуємо випадкові яскравість, роздільну здатність та різкість для поповнення даних.

```
train_data_gen = ImageDataGenerator(
   brightness_range=[0.8, 1.2],
   zoom_range=0.2,
   preprocessing_function=lambda x: cv2.GaussianBlur(x, (5, 5), 0)
)
```

Завантажимо та підготуємо для використання у тренуванні зображення:

```
train_images, train_labels = [], []

for index, row in train_df.iterrows():
   image_path, label = row[“image_path”], row[“label”]
   try:
      image = cv2.imread(image_path, cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
      if image is None:
         print(f“Could not read image: {image_path}”)
         continue
      image = cv2.resize(image, (configs.width, configs.height))
      image = image / 255.0 # Нормалізація
      train_images.append(np.expand_dims(image, axis=-1))
      train_labels.append(text_to_sequence(label))
   except Exception as e:
      print(f“Error processing image {image_path}: {e}”)
train_images = np.array(train_images)
train_labels = np.array(train_labels)
```

Перетворимо текстові мітки у числовий формат з падинґом для використання функції втрат далі.

```
train_labels = [text_to_sequence(label) for label in train_df[“label”]]
val_labels = [text_to_sequence(label) for label in val_df[“label”]]
# Застосування падинґу
train_labels = pad_sequences(train_labels, maxlen=configs.max_text_length, padding=“post”,
value=-1)
val_labels = pad_sequences(val_labels, maxlen=configs.max_text_length, padding=“post”,
value=-1)
# Підготовка наборів даних
train_dataset = tf.data.Dataset.from_tensor_slices((train_images, train_labels))
train_dataset = train_dataset.batch(configs.batch_size).prefetch(tf.data.AUTOTUNE)
val_dataset = tf.data.Dataset.from_tensor_slices((val_images, val_labels))
val_dataset = val_dataset.batch(configs.batch_size).prefetch(tf.data.AUTOTUNE)
```

Модель розпізнавання рукописного тексту базується на згортковій нейронній мережі. Модель отримує зображення на вході і створює послідовність міток (символьних позначок) для кожного зображення на виході.

Шари згортки використовуються для виділення ознак із зображень. LSTM-шари (long short-term memory) [2] фіксують зв’язки між символами в мітках, що дозволяє краще розуміти контекст та порядок символів. Вихідні дані з шарів LSTM проходять через щільний шар з активацією softmax [3], який створює розподіл ймовірностей для символів у словнику для кожного часового кроку, що дозволяє передбачити правильну мітку для кожного символу на вхідному зображенні.

Процес навчання моделі базується на використанні функції втрат CTC, яка дозволяє моделі прогнозувати послідовності символів без явного вирівнювання між входом і виходом. Цей підхід є ключовим для обробки даних, де довжина вхідних і вихідних послідовностей може відрізнятися.

Оптимізація параметрів здійснюється за допомогою алгоритму Adam [4], який автоматично налаштовує швидкість навчання, використовуючи градієнти першого та другого порядків. Це забезпечує ефективну збіжність та покращує стабільність навчання.

Оцінка ефективності моделі виконується за допомогою метрик CWER та WER [5]. CWER визначає відсоток помилок на рівні символів, а WER оцінює точність розпізнавання на рівні слів у реченнях. Комбінація цих метрик дозволяє точно виміряти продуктивність моделі як на символічному, так і на словесному рівнях.

Визначимо зворотні виклики, які будуть використовуватися під час навчання:

```
callbacks = [
   EarlyStopping(patience=10, restore_best_weights=True),
   ModelCheckpoint(os.path.join(configs.model_path,“best_model.h5”),save_best_only=True),
   ReduceLROnPlateau(patience=5, factor=0.5, verbose=1),
   TensorBoard(log_dir=os.path.join(configs.model_path, “logs”)),
   MetricsLogger(val_data=val_dataset, char_list=configs.vocab)
]
```

EarlyStopping [6] – зупиняє навчання, якщо продуктивність на валідації не покращується протягом 10 епох (patience=10). Параметр restore_best_weights=True відновлює ваги з найкращої епохи;

ModelCheckpoint [6] – зберігає ваги моделі у файл наприкінці кожної епохи в разі покращення продуктивності на тестовому наборі;

ReduceLROnPlateau [6] – зменшує швидкість навчання оптимізатора вдвічі, якщо продуктивність моделі на валідаційному наборі не покращується протягом заданих 5 епох. Повідомлення про зміну швидкості виводиться в консоль;

TensorBoard [7] – записує метрики навчання та валідації в лог-файли, які потім можна переглянути за допомогою веб-інструмента TensorBoard для візуалізації та аналізу;

MetricsLogger – вимірює та виводить CWER та WER під час тренування моделі для оцінки її продуктивності, допомагає контролювати якість моделі під час тренувального процесу.

Після навчання модель зберігається для подальшого використання.

Тренування моделі:

```
model.fit(
   train_dataset,
   validation_data=val_dataset,
   epochs=configs.train_epochs,
   callbacks=callbacks
)
```

Процес тренування можна побачити у терміналі під час запуску програми (рис. 2).

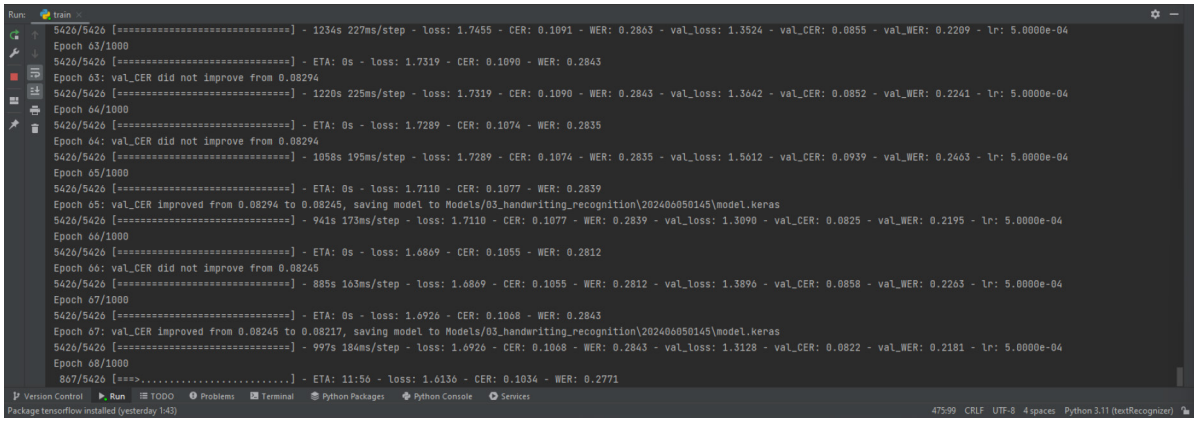


Рис. 2. Процес тренування моделі

Проаналізуємо як навчилася модель, відкривши TensorBoard і переглянувши на метрики оцінки Character Error Rate (рис. 3) і Word Error Rate (рис. 4). З графіків бачимо поступове покращення передбачень моделі, яке в результаті навчання впродовж 67 епох досягла помилки в символах 0.1104 що означає що лише у 11.04 % випадків символ передбачено неправильно. Цей результат є доволі високим.

Помилки ж на рівні слів близько 30 %. Крім цього, можна зауважити аномальні стрибки значень графіку, причиною яких скоріше за все є присутність розділових знаків у наборі даних. Після завершення процесу навчання проведемо тестування моделі на валідаційному наборі даних, щоб оцінити її продуктивність на даних, яких вона не бачила під час навчання.

Для цього використаємо ті ж метрики, які показує відсоток символів та слів, які модель прогнозує неправильно. Показник CER був обраний, оскільки він найбільш точно відображає точність розпізнавання на рівні

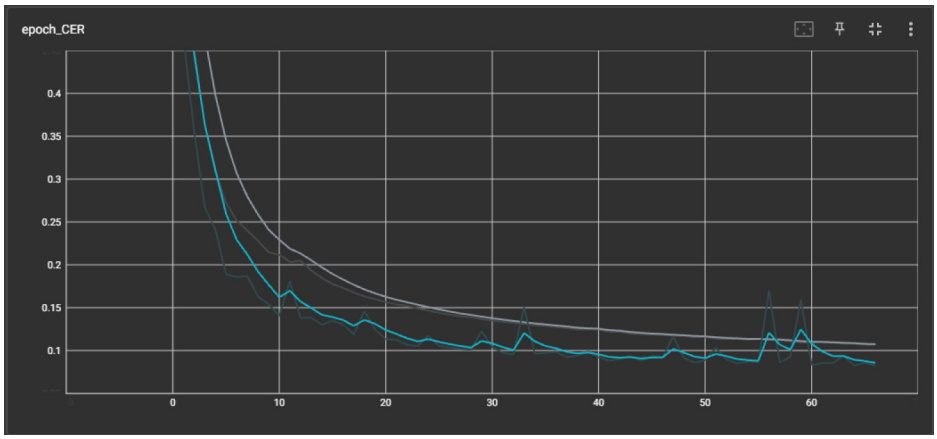


Рис. 3. Character Error Rate

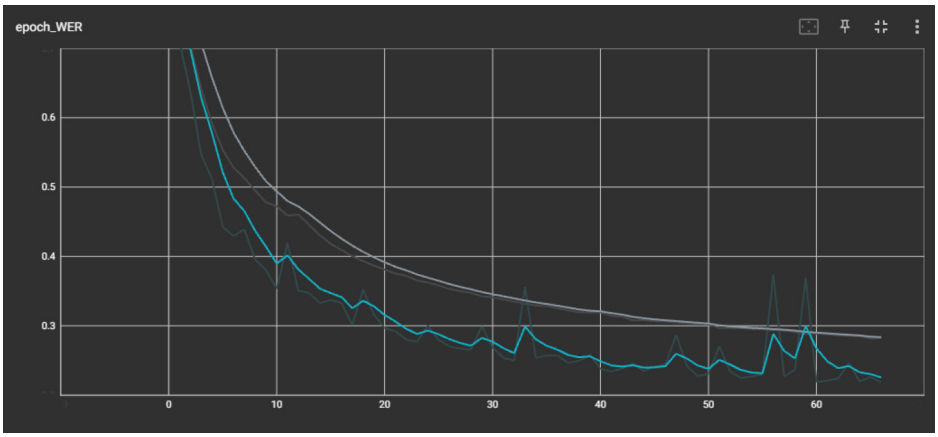


Рис. 4. Word Error Rate

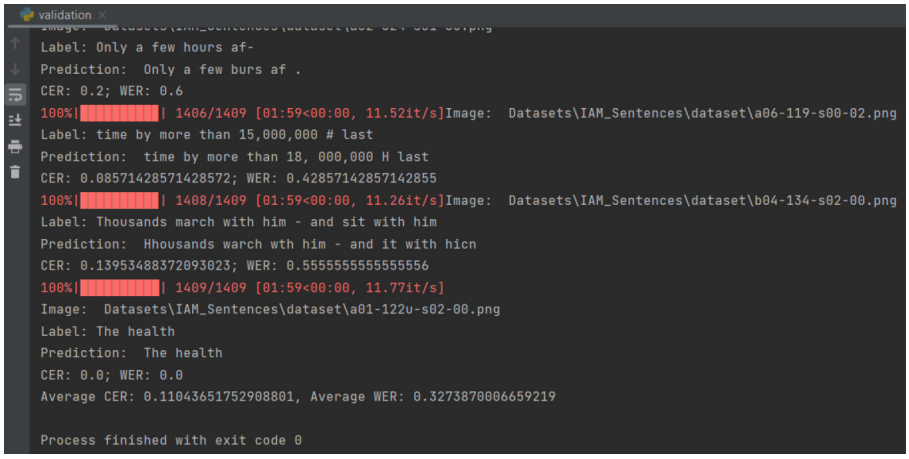


Рис. 5. Визначення точності моделі



Рис. 6. Приклад розпізнавання тексту зображення

символів. Процес перевірки на валідаційних даних з IAM Sentences та на зображеннях тексту на рисунках 5 та 6 відповідно.

Цей результат є досить хорошим для задачі розпізнавання рукописного тексту, враховуючи складність розпізнавання різних почерків та можливих варіацій у написанні символів. Проте модель має потенціал для подальшого покращення шляхом оптимізації даних та налаштувань параметрів.

Висновки

Було детально розглянуто процес підготовки набору даних IAM Sentences для навчання моделі розпізнавання рукописного тексту, включаючи читання та розбір даних, побудову та навчання моделі на основі згорткових нейронних мереж. Навчання моделі проводилося з використанням функції втрат CTC та оптимізатора Adam та дозволило досягти високої точності розпізнавання. Оцінка якості моделі проводилася за допомогою метрики CER та інструментарію TensorBoard та показала ефективність розробленої системи.

Було проаналізовано результати роботи моделі розпізнавання рукописного тексту, в результаті тестування на валідаційному наборі даних. Було встановлено, що середній CER у 11.04 % свідчить про високу точність моделі, проте має потенціал для подальшого покращення. Розглянуто можливі напрямки для подальшого розвитку та оптимізації системи, що допоможе покращити її продуктивність та розширити спектр застосувань

Навчання моделі на більшому або більш різноманітному наборі даних може покращити її здатність до узагальнення. Додавання додаткових шарів або параметрів, а також використання інших оптимізаторів може покращити продуктивність моделі. Використання методів доповнення, таких як додавання шуму або перетворення зображень, допоможе моделі краще узагальнювати дані. Крім цього, в майбутньому модель можна модифікувати для розпізнавання рукописів з інших мов.

В подальшому буде розроблено функціонал API, яке прийматиме фотографію рукописного тексту і надсилатиме у відповідь розпізнаний текст та сам мобільний застосунок, який взаємодіятиме з серверною частиною у вигляді API.

Список використаної літератури

1. IAM Handwriting Database. URL: https://fki.tic.heia-fr.ch/databases/iam-handwriting-database (дата звернення: 07.06.2025).
2. Discover LSTM. NVIDIA Developer. 2024. URL: https://developer.nvidia.com/discover/lstm (дата звернення: 07.06.2025).
3. The Role of Softmax in Neural Networks: Detailed Explanation and Applications. GeeksforGeeks. 2024. URL: https://www.geeksforgeeks.org/the-role-of-softmax-in-neural-networks-detailed-explanation-and-applications/ (дата звернення: 07.06.2025).
4. Adam Optimizer. Keras. 2024. URL: https://keras.io/api/optimizers/adam/ (дата звернення: 07.06.2025).
5. WER, CER, MER Metrics. Kolena. 2024. URL: https://docs.kolena.com/metrics/wer-cer-mer/ (дата звернення: 07.06.2025).
6. Keras Callbacks API. TensorFlow. 2024. URL: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/callbacks (дата звернення: 07.06.2025).
7. TensorBoard. TensorFlow. 2024. URL: https://www.tensorflow.org/tensorboard (дата звернення: 07.06.2025).
8. Nebauer C. Evaluation of convolutional neural networks for visual recognition. IEEE Transactions on Neural Networks. 1998. Vol. 9, no. 4. P. 685–696. DOI: 10.1109/72.701181.
9. Yamashita R., Nishio M., Do R. K. G. et al. Convolutional neural networks: an overview and application in radiology. Insights Imaging. 2018. Vol. 9. P. 611–629. DOI: 10.1007/s13244-018-0639-9.
10. Mienye I. D., Swart T. G., Obaido G. Recurrent Neural Networks: A Comprehensive Review of Architectures, Variants, and Applications. Information. 2024. Vol. 15, no. 9. P. 517. DOI: 10.3390/info15090517.

References

1. IAM Handwriting Database. URL: https://fki.tic.heia-fr.ch/databases/iam-handwriting-database. [in English].
2. Discover LSTM. NVIDIA Developer. 2024. URL: https://developer.nvidia.com/discover/lstm. [in English].
3. The Role of Softmax in Neural Networks: Detailed Explanation and Applications. GeeksforGeeks. 2024. URL: https://www.geeksforgeeks.org/the-role-of-softmax-in-neural-networks-detailed-explanation-and-applications/ [in English].
4. Adam Optimizer. Keras. 2024. URL: https://keras.io/api/optimizers/adam/. [in English].
5. WER, CER, MER Metrics. Kolena. 2024. URL: https://docs.kolena.com/metrics/wer-cer-mer/. [in English].
6. Keras Callbacks API. TensorFlow. 2024. URL: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/callbacks [in English].

7. TensorBoard. TensorFlow. 2024. URL: https://www.tensorflow.org/tensorboard [in English].

8. Nebauer C. Evaluation of convolutional neural networks for visual recognition. IEEE Transactions on Neural Networks. 1998. Vol. 9, no. 4. P. 685–696. DOI: 10.1109/72.701181 [in English].

9. Yamashita R., Nishio M., Do R. K. G. et al. Convolutional neural networks: an overview and application in radiology. Insights Imaging. 2018. Vol. 9. P. 611–629. DOI: 10.1007/s13244-018-0639-9 [in English].

10. Mienye I. D., Swart T. G., Obaido G. Recurrent Neural Networks: A Comprehensive Review of Architectures, Variants, and Applications. Information. 2024. Vol. 15, no. 9. P. 517. DOI: 10.3390/info15090517 [in English].

УДК 330.42 (075.8) DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.9

О. Й. ВЕЙЦБЛІТ
доцент кафедри комп'ютерних наук та програмної інженерії
Херсонський державний університет
ORCID: 0009-0008-6057-5267

І. В. ВИГОДНЕР
старший викладач кафедри інформатики та комп'ютерних наук
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-4476-557X

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЛЄОНТЬЄВА НА САЙТІ DJANGO

Метою роботи є демонстрація сайту, створеного для візуалізації процесів міжгалузевих зв'язків згідно з моделлю Лєонтьєва. З часів Ньютона основою наукової відповіді на реальні, не зовсім прості проблеми завжди є побудова математичної моделі, тобто математичної теорії, що описує деякі об'єкти чи процеси реального світу. Як правило, потім будують програмну реалізацію цієї моделі, за допомогою якої чисельно отримують результати цієї теорії.

Правильність результатів теорії має бути перевірена експериментально. Аналіз економічних процесів та прийняття відповідних рішень, вивчення відповідних моделей в освітніх курсах математичного моделювання завжди значно вдосконалюються при їх візуалізації. І саме така візуалізація була реалізована для моделі Лєонтьєва.

У нашому випадку математична модель – це математична задача з матричної алгебри, до вирішення якої завдяки дослідженням американського економіста В. Лєонтьєва зводиться дана економічна задача. В результаті її розв'язання отримуємо не тільки числові значення характеристик, але також оцінки прибутковості та рентабельності галузей економіки та можливість детально переглянути їх фактори. Розробка сайту виконана на основі Python фреймворку для розробки веб-систем Django. Це високорівневий Python веб-фреймворк, який відкриває можливість створювати добре захищені сайти і підтримувати їх, він бере на себе більшу частину веб-розробки. Django надає розробникам буквально все необхідне, щоб розробити сайт з нуля – це є його основна філософія. Для отримання даних у вигляді табличних розрахунків матриць і відображення графіків застосовані відповідні Python бібліотеки NumPy та Chart.js. При створенні сайту застосовані також і інші традиційні інструменти веб-розробки: HTML (bootstrap), CSS, JavaScript (jQuery). Цей сайт був використаний при викладанні курсів «Математичне моделювання процесів та явищ», «Моделювання економічних процесів» і «Економіко-математичні методи та моделі» у Херсонському державному університеті та Херсонському національному технічному університеті.

Ключові слова: *візуалізація процесів, економічна задача, математична модель, сайт, Python фреймворк.*

A. Y. WEISSBLUT
Associated Professor at the Department
of Computer Science and Software Engineering
Kherson State Univercity
ORCID: 0009-0008-6057-5267

I. V. VYGODNER
Senior Lecturer at the Department of Informatics and Computer Sciences
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-4476-557X

VISUALIZATION OF LEONTIEV'S MATHEMATICAL MODEL ON THE DJANGO WEBSITE

The purpose of the work is to demonstrate a site created to visualize the processes of inter-industry connections according to Leontiev's model. Since the time of Newton, the basis of a scientific answer to real, not entirely simple problems has always been the construction of a mathematical model, that is, a mathematical theory that describes some objects or processes of the real world. As a rule, a software implementation of this model is then built, with the help of which the results of this theory are numerically obtained.

The correctness of the results of the theory must be verified experimentally. The analysis of economic processes and the adoption of appropriate decisions, the study of appropriate models in educational courses on mathematical modeling are always significantly improved by their visualization. And it is precisely such visualization that was implemented for the Leontiev's model.

In our case, the mathematical model is a mathematical problem from matrix algebra, to the solution of which this economic problem can be reduced thanks to the research of the American economist V. Leontiev. As a result of its solution, we get not only the numerical values of the characteristics, but also estimates of the profitability and profitability of the sectors of the economy and the opportunity to review their factors in detail. The development of the site is based on the Python framework for the development of Django web systems. It is a high-level Python web framework that opens up the possibility of creating well-secured websites and maintaining them, it takes care of most of the web development. Django provides developers with literally everything they need to develop a website from scratch – this is its core philosophy. To obtain data in the form of matrix table calculations and display graphs, the corresponding Python libraries NumPy and Chart.js were used. Other traditional web development tools were also used when creating the site: HTML (bootstrap), CSS, JavaScript (jQuery).

This site was used in teaching the courses "Mathematical Modeling of Processes and Phenomena", "Modeling of Economic Processes" and "Economic and mathematical methods and models" at Kherson State University and Kherson National Technical University.

Key words: *visualization of processes, economic problem, mathematical model, site, Python framework.*

Постановка проблеми

Зазвичай вироблені продукти (цвяхи, чіпи чи молоко) не цілком надходять до ринку для продажу, а частково використовуються для виробництва інших продуктів. Ці продукти, у свою чергу, зазвичай також частково надходять на відкритий ринок, а частково використовуються у виробництві інших продуктів (у тому числі можливо вихідних чипів або цвяхів). Усе це створює складну систему взаємозв'язків, де далеко не все та не завжди відомо з відкритого доступу [1]. В результаті лише обсяг товару, що надійшов на продаж на відкритому ринку, тобто сукупний обсяг кінцевого продукту є відомим із відкритого доступу, а весь сукупний вироблений продукт, тобто валовий продукт залишається прихованим. Але валовий продукт, ВВП – це найважливіша характеристика, вкрай необхідна фахівцям [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

З часів Ньютона основою наукової відповіді на реальні, не зовсім прості проблеми завжди є побудова математичної моделі, тобто математичної теорії, що описує деякі об'єкти чи процеси реального світу [3]. Як правило, потім будують програмну реалізацію цієї моделі, за допомогою якої чисельно отримують результати цієї теорії.

Формулювання мети дослідження

Правильність результатів будь-якої теорії має бути перевірена експериментально [4]. У нашому відносно простому прикладі математична модель – це математична задача з матричної алгебри, до вирішення якої завдяки дослідженням американського економіста В. Леонтьєва зводиться дана економічна задача. В результаті її розв'язання отримуємо не тільки числове значення ВВП, але також оцінки прибутковості та рентабельності галузей економіки та можливість детально переглянути їх фактори.

Аналіз економічних процесів та прийняття відповідних рішень, вивчення відповідних моделей в освітніх курсах математичного моделювання завжди значно вдосконалюються при їх візуалізації. І саме така візуалізація була реалізована для моделі Лєонтьєва. Цей сайт був використаний при викладанні курсів «Математичне моделювання процесів та явищ», «Економіко-математичні методи та моделі» і «Моделювання економічних процесів» у Херсонському державному університеті та Херсонському національному технічному університеті.

Метою роботи є демонстрація сайту, створеного для візуалізації процесів міжгалузевих зв'язків згідно з моделлю Лєонтьєва.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розглянемо багатогалузеву економіку, що складається з n різних галузей і нехай x_i – загальний обсяг продукції i-ї галузі (тобто її валовий випуск), а x_{ij} – той обсяг продукції i-ї галузі, який використовується j-ї галуззю при виробництві продукції.

За часів другої світової війни В. Леонтьєв, взявши за приклад економіку США встановив, що величини $a_{ij} = x_{ij} / x_i$ протягом довгого часу практично не змінюються і в середньостроковій перспективі їх можна розглядати як постійні числа. Це можна пояснити тим, що технологія виробництва залишається незмінною досить тривалий термін, і тому відносний обсяг споживання галуззю продукції іншої галузі при виробництві власної продукції є технологічною константою. Відповідно величини a_{ij} називають технологічними коефіцієнтами.

Нехай y_i – кінцевий обсяг продукції i-ї галузі, який використовується для реалізації на відкритому ринку. Тоді балансове співвідношення між обсягами виробництва в різних галузях економіки має вигляд:

$$x_i = x_{i1} + x_{i2} + \ldots + x_{in} + y_i, \quad (i = 1, 2, \ldots, n).$$

Враховуючи гіпотезу лінійності $a_{ij} = x_{ij} / x_j$; $x_{ij} = a_{ij}x_j$, $(i, j = 1, 2, \ldots, n)$, отримаємо звідси таку систему n лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} x_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n +; \\ x_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \ldots + a_{2n}x_n + y_2; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ x_n = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \ldots + a_{nn}x_n + y_n. \end{cases}$$

Напишемо цю систему у матричній формі. Розглянемо вектори-стовпці обсягу виробленої валової продукції $\overline{x}$, обсягу продукції кінцевого споживання $\overline{y}$ і матрицю технологічних коефіцієнтів A:

$$\overline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \ldots \\ x_n \end{pmatrix}, \quad \overline{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \ldots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} a_{11}\ a_{12}\ldots a_{1n} \\ a_{21}\ a_{22}\ldots a_{2n} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ a_{n1}\ a_{n2}\ldots a_{nn} \end{pmatrix}. \tag{1}$$

Тоді система рівнянь в матричній формі буде виглядати так:

$$\overline{x} = A\overline{x} + \overline{y}.$$

Це співвідношення називається рівнянням лінійного міжгалузевого балансу.

Звичайно, знаючи обсяг валової продукції $\overline{x}$, з цього рівняння можна дізнатись обсяг кінцевого продукту: $\overline{y} = \overline{x} - A\overline{x}$. Проте наша справжня реальна задача – знайти $\overline{x}$ з відомого $\overline{y}$. Для цього рівнянню лінійного міжгалузевого балансу можна надати вигляд

$$(E - A)\overline{x} = \overline{y},$$

де E – одинична матриця. Звідси

$$\overline{x} = (E - A)^{-1}\overline{y}, \tag{2}$$

якщо існує зворотна матриця $(E - A)^{-1}$.

Технологічну матрицю A та модель Лєонтьєва називають продуктивними (за змістом реальними), якщо існує зворотна матриця $(E - A)^{-1}$ та для кожного $\overline{y}$ з додатними компонентами y_i вектор $\overline{x} = (E - A)^{-1}\overline{y}$ також має всі додатні компоненти x_i. Саме так і буде, якщо суми компонентів по стовпцям або по рядкам технологічної матриці A менші за одиницю. У такому випадку зворотну матрицю можна розкласти в суму геометричної прогресії:

$$(E - A)^{-1} = E + A + A^2 + A^3 + \ldots + A^n + \ldots.$$

Тоді

$$\overline{x} = (E - A)^{-1}\overline{y} = \overline{y} + A\overline{y} + A^2\overline{y} + A^3\overline{y} + \ldots + A^k\overline{y} + \ldots. \tag{3}$$

Ця формула дозволяє проаналізувати фактори, на які розкладається валовий продукт $\overline{x}$. Тут $\overline{y}$ – кінцевий продукт, $A\overline{y}$ – продукція, що йде на виготовлення $\overline{y}$, її називають першою похідною продукцією, продукт $A^2\overline{y}$ йде на виготовлення $A\overline{y}$ та називається другою похідною продукцією, …, $A^k\overline{y}$ – це k-та похідна продукція, вона йде на виготовлення продукту $A^{k-1}\overline{y}$.

Сайт «Балансова модель Лєонтьєва»

Розробка сайту виконана на основі фреймворку для розробки веб-систем Django [5]. Це високорівневий Python веб-фреймворк, який відкриває можливість створювати добре захищені сайти і підтримувати їх, він бере на себе більшу частину веб-розробки. Django надає розробникам буквально все необхідне, щоб розробити сайт з нуля – це є його основна філософія. Для отримання даних у вигляді табличних розрахунків матриць і відображення графіків застосовані відповідні Python бібліотеки NumPy та Chart.js [6], [7]. При створенні сайту застосовані також і інші традиційні інструменти веб-розробки: HTML (bootstrap), CSS, JavaScript (jQuery).

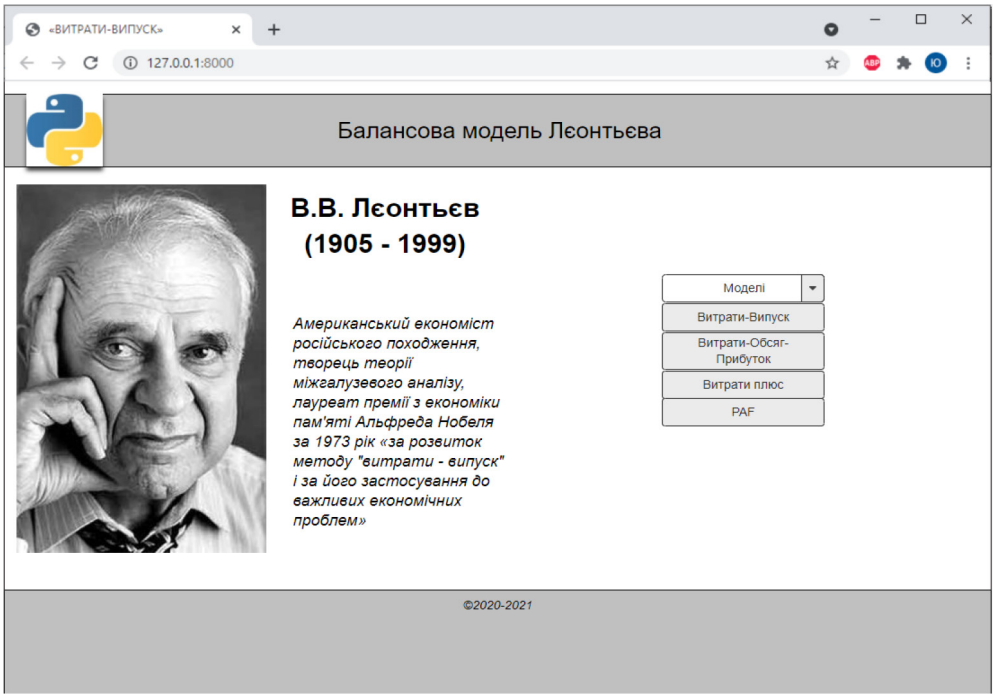


Рис. 1. Головна сторінка сайту

Це головна сторінка сайту. Робота починається з вибору конкретної моделі серед декількох прикладів. Після цього автоматично відкривається наступна сторінка.

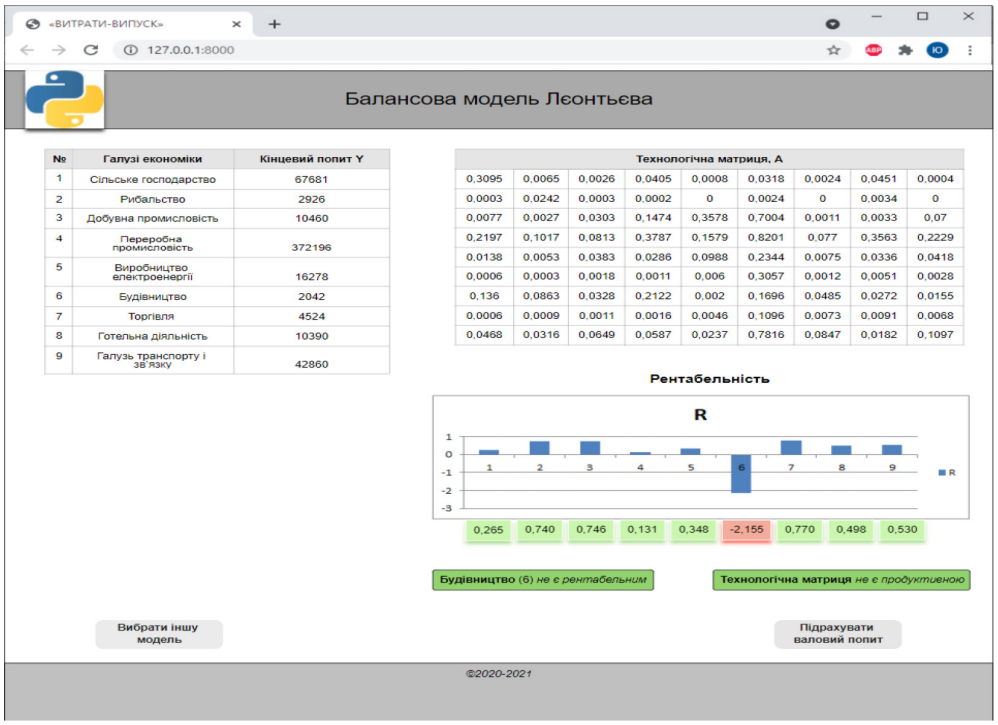


Рис. 2. Сторінка вибору моделі галузевої економіки

Для обраної моделі економіки наведені зліва її 9 галузей та вектор кінцевого споживання $\overline{y}$ цих галузей, а зправа відповідна технологічна матриця A порядку 9. Нижче можна побачити гістограму рентабельностей. Скажімо, для галузі 6 (будівництво) її рентабельність b_6 визначається за формулою $b_6 = 1 - \sum_{i=1}^{9} a_{i6}$, де a_{i6} – це технологічні коефіцієнти з A (див. (1)). Галузь є рентабельною, якщо її рентабельність додатна; в цьому випадку

такими є всі галузі окрім будівництва. Але оскільки це так для будівництва, то технологічна матриця A не є продуктивною. Можливо це є вказівкою на необхідність перетворення та покращення міжгалузевого балансу для цієї моделі, а нам доцільно обрати іншу модель. Так чи інакше це створює формальні перешкоди: не гарантується, що подальший економічний аналіз обраної моделі на сайті є можливим і чи це насправді можливо перевірити лише безпосереднім застосуванням відповідних обчислень? Саме так і зробимо. Натиснувши кнопку «Підрахувати валовий попит», переходимо до відповідної сторінки сайту.

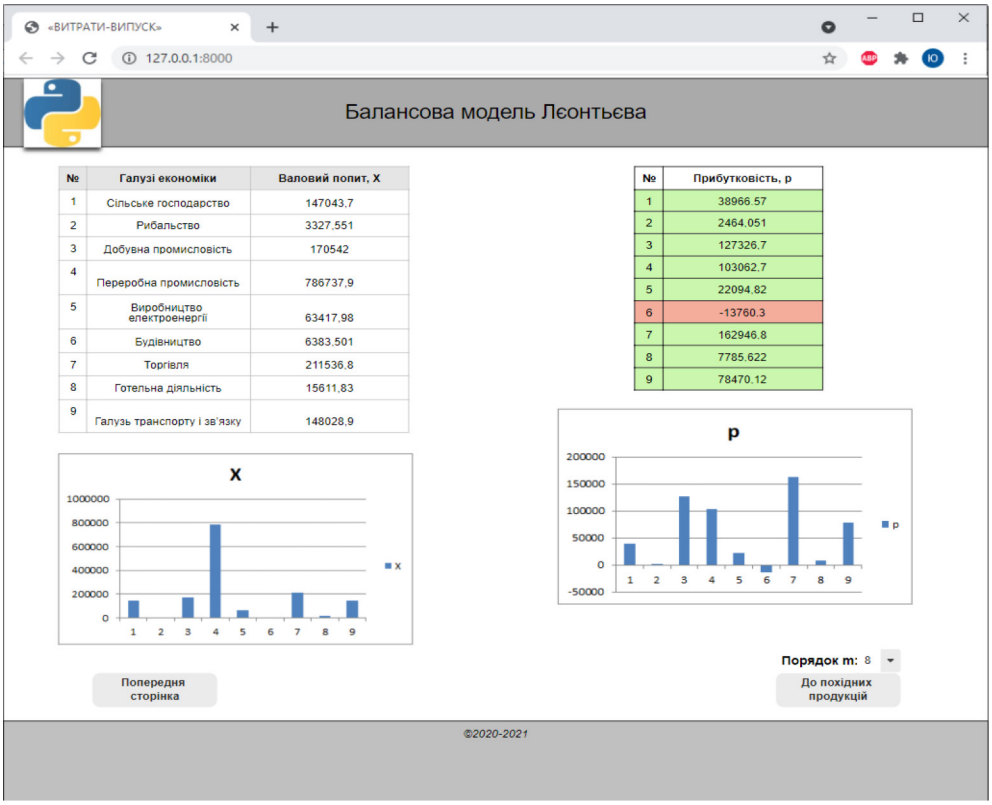


Рис. 3. Сторінка підрахунку валового попиту

На цій сторінці зліва наведені дані валового продукту X по галузям економіки для обраної моделі, підраховані за формулою (2), знизу від них відповідна гістограма. Справа на сторінці наведені значення прибутковості P галузей, які дорівнюють добутку значень рентабельності з попередньої сторінки на відповідні значення валового продукту, та відповідна гістограма. Звичайно, для цієї моделі прибуток галузі будівництва виявляється від'ємним, тобто, насправді збитком. Нижче можна задати максимальний порядок похідної, який ми збираємось досліджувати далі та, натиснувши на кнопку «до похідних продукції», переходимо до наступної сторінки.

На наступній сторінці для кожної галузі можна побачити отримані раніше кінцевий та валовий продукт, а між ними значення похідних продукції за формулою (3) з першої до обраної на попередній сторінці максимальної, до восьмої в даному випадку.

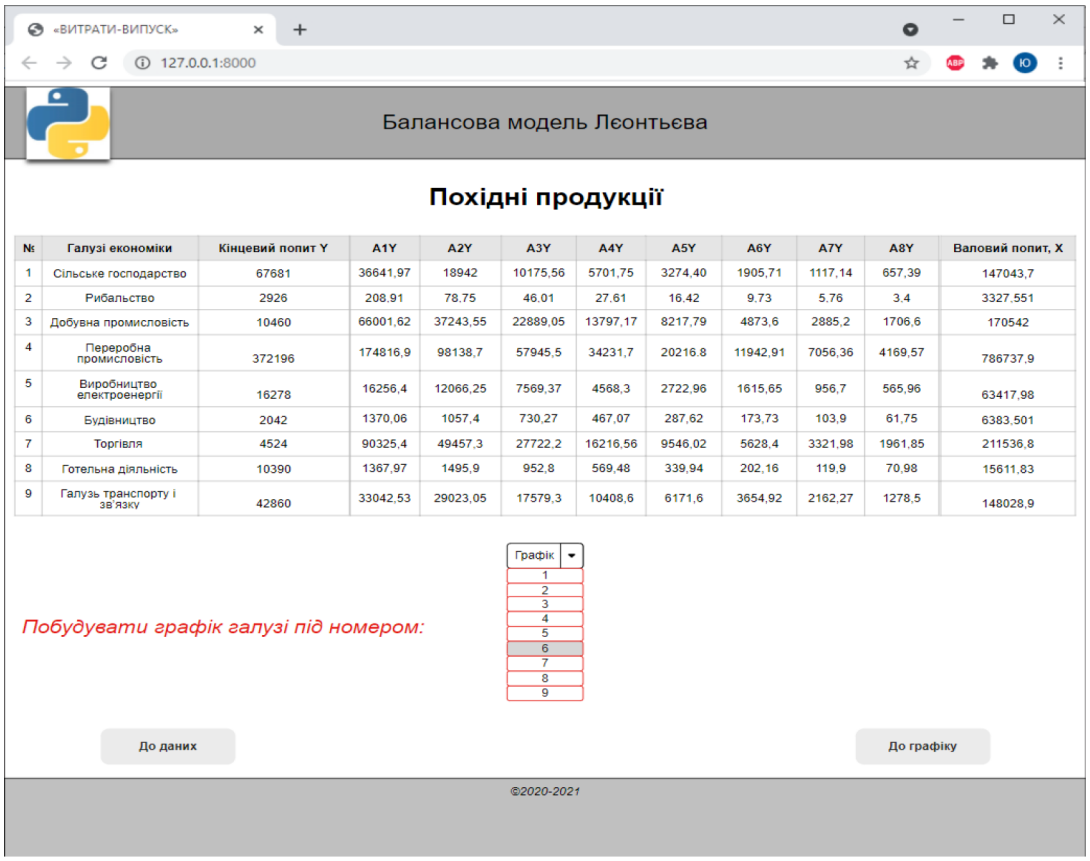
Для кожної галузі можна отримати графіки похідних, що надає можливість візуалізувати та покращити більш детальний аналіз міжгалузевого балансу. Натискаємо на кнопку «до графіку» та обраємо номер галузі, графік якої необхідно отримати. Наступна сторінка:

Тут зверху значення похідних для обраної галузі та відповідний графік, знизу для кожного номеру k від 1 до 8 накопичені значення, тобто сума кінцевого продукту та всіх похідних від 1 до k. На графіку накопичених похідних можна побачити, як вони сходяться до валового продукту. Ці графіки надають можливість оцінити значущість похідних у спільному міжгалузевому балансі. Якщо натиснути кнопку «попередня сторінка», можемо обрати іншу галузь, а з цим повернутись до сторінки графіків. Натискаємо на кнопку «до даних» та повертаємось на головну сторінку, де можна обрати якусь іншу модель.

Тут обрано нову модель галузевої економіки з умовною назвою «витрати – випуск», де на відміну від попередньої технологічна матриця є продуктивною.

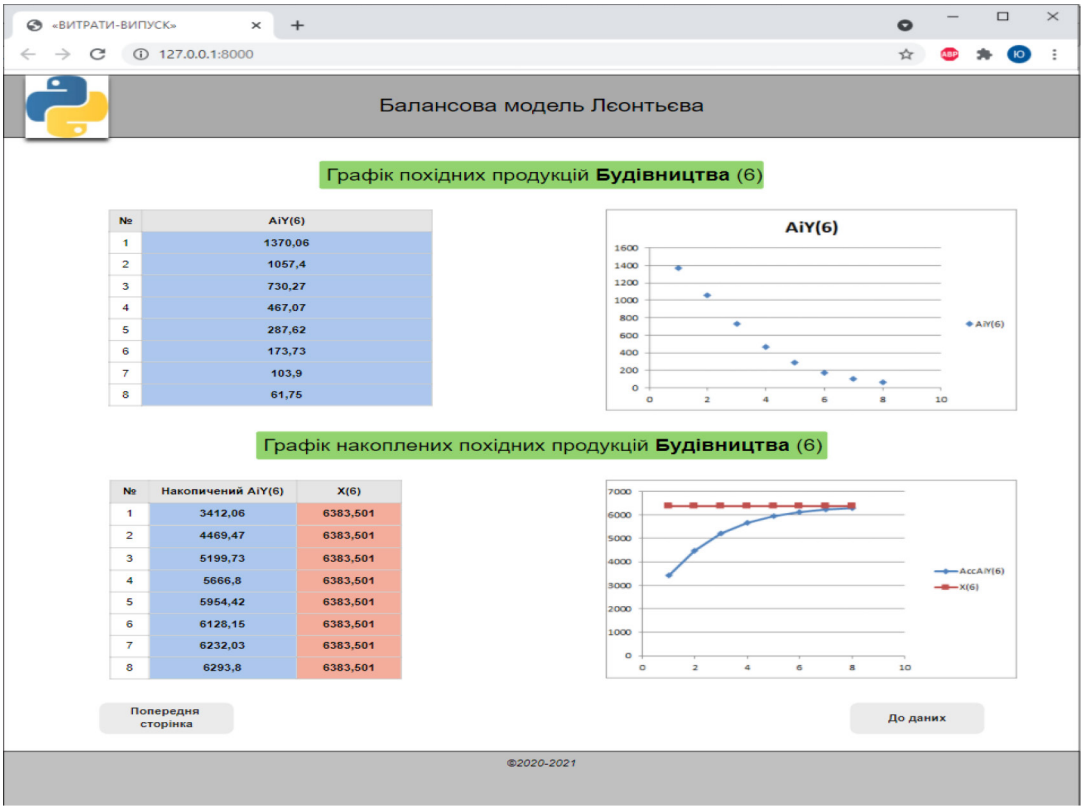
Висновки

Метою роботи є демонстрація сайту, створеного для візуалізації процесів міжгалузевих зв'язків згідно з моделлю Лєонтьєва.



№	Галузі економіки	Кінцевий попит Y	A1Y	A2Y	A3Y	A4Y	A5Y	A6Y	A7Y	A8Y	Валовий попит, X
1	Сільське господарство	67681	36641,97	18942	10175,56	5701,75	3274,40	1905,71	1117,14	657,39	147043,7
2	Рибальство	2926	208.91	78.75	46.01	27.61	16.42	9.73	5.76	3.4	3327.551
3	Добувна промисловість	10460	66001,62	37243,55	22889,05	13797,17	8217,79	4873,6	2885,2	1706,6	170542
4	Переробна промисловість	372196	174816,9	98138,7	57945,5	34231,7	20216.8	11942,91	7056,36	4169,57	786737,9
5	Виробництво електроенергії	16278	16256,4	12066,25	7569,37	4568,3	2722,96	1615,65	956,7	565,96	63417,98
6	Будівництво	2042	1370,06	1057,4	730,27	467,07	287,62	173,73	103,9	61,75	6383,501
7	Торгівля	4524	90325,4	49457,3	27722,2	16216,56	9546,02	5628,4	3321,98	1961,85	211536,8
8	Готельна діяльність	10390	1367,97	1495,9	952,8	569,48	339,94	202,16	119,9	70,98	15611,83
9	Галузь транспорту і зв'язку	42860	33042,53	29023,05	17579,3	10408,6	6171,6	3654,92	2162,27	1278,5	148028,9

Рис. 4. Сторінка обчислення похідних продукції



№	AiY(6)
1	1370,06
2	1057,4
3	730,27
4	467,07
5	287,62
6	173,73
7	103,9
8	61,75

№	Накопичений AiY(6)	X(6)
1	3412,06	6383,501
2	4469,47	6383,501
3	5199,73	6383,501
4	5666,8	6383,501
5	5954,42	6383,501
6	6128,15	6383,501
7	6232,03	6383,501
8	6293,8	6383,501

Рис. 5. Сторінка візуалізації графіків похідних

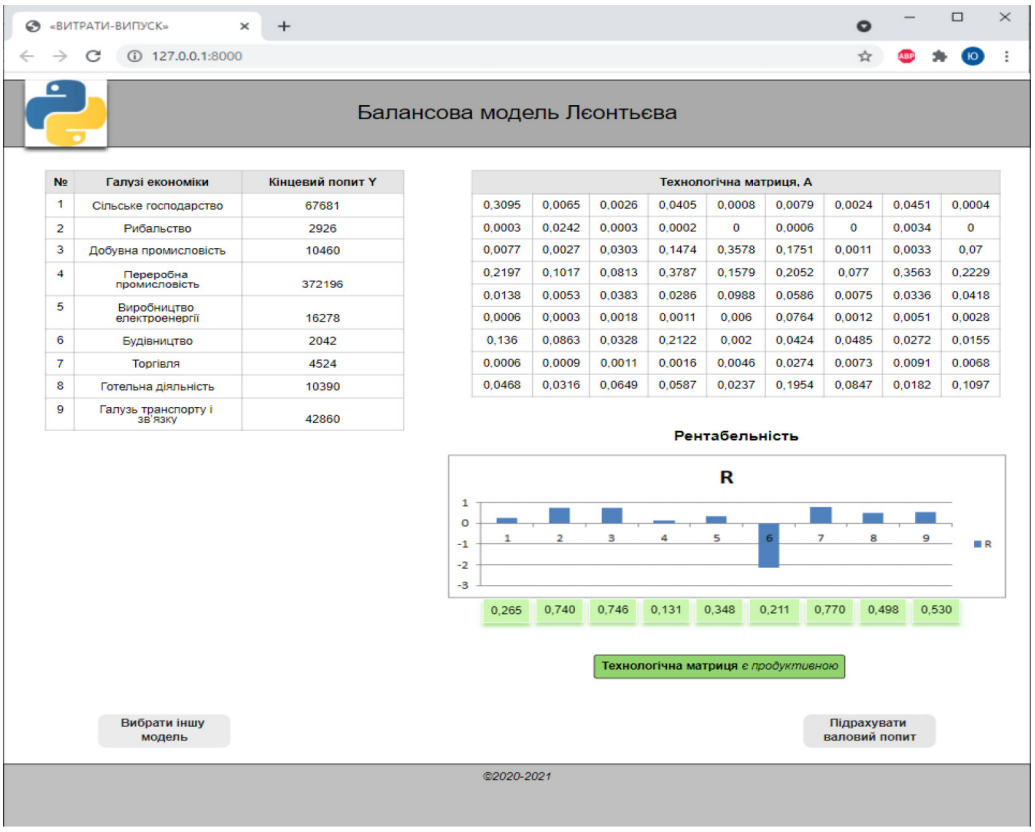


Рис. 6. Сторінка вибору нової моделі галузевої економіки

В наведеному випадку математична модель – це задача з матричної алгебри, до вирішення якої завдяки дослідженням американського економіста В. Леонтьєва зводиться дана економічна задача. В результаті її розв'язання отримуємо не тільки числове значення ВВП, але також оцінки прибутковості та рентабельності галузей економіки та можливість детально переглянути їх фактори.

Розробка сайту виконана на основі фреймворку для розробки веб-систем Django. Це високорівневий Python веб-фреймворк, який дає можливість зручно створювати добре захищені сайти і підтримувати їх використання. Для отримання даних у вигляді табличних розрахунків матриць і відображення графіків застосовані відповідні Python бібліотеки NumPy та Chart.js. При створенні сайту застосовані також і інші традиційні інструменти веб-розробки: HTML (bootstrap), CSS, JavaScript (jQuery).

Цей сайт був використаний при викладанні курсів «Математичне моделювання процесів та явищ», «Економіко – математичні методи та моделі» і «Моделювання економічних процесів» у Херсонському державному університеті та Херсонському національному технічному університеті.

Список використаної літератури

1. Сафрончук М. В. Економічне зростання. Курс економічної теорії / М. В. Сафрончук. К. : АСА, 2004. 605–644 с.
2. Schulz, A. W.: Beyond the Hype: The Value of Evolutionary Theorizing in Economics. Philosophy of the social sciences / A. W. Schulz. 43(1). (2013) 46 – 72 с.
3. G. Dubois, Modeling and Simulation / Dubois G., Taylor F, 2018., CRC Press.
4. Morrison, M. Models, measurement and computer simulation: the changing face of experimentation. Philosophical Studies, (2012), 143, 33–57.
5. Офіційна документація Django. URL: https://docs.djangoproject.com/en/3.2/
6. Офіційна документація NumPy. URL: https://numpy.org/doc/stable/user/whatisnumpy.html
7. Офіційна документація chart.js. URL: https://www.chartjs.org/docs/latest/

References

1. Safronchuk, M., (2024). Economic growth. Course of economic theory. K. : ASA [in Ukraine].
2. Schulz, A. (2013). Beyond the Hype: The Value of Evolutionary Theorizing in Economics. Philosophy of the social sciences. 43(1). (2013) 46 – 72 с.

3. Dubois, G., Taylor, F., (2018). Modeling and Simulation, CRC Press [in USA].
4. Morrison, (2012). M. Models, measurement and computer simulation: the changing face of experimentation. Philosophical Studies, 143, 33–57 [in Canada].
5. Django documentation. URL [Ofitsiyna dokumentatsiya Django]. URL: https://docs.djangoproject.com/en/3.2/
6. Official documentation NumPy. [Ofitsiyna dokumentatsiya NumPy]. URL: https://numpy.org/doc/stable/user/whatisnumpy.html
7. Official documentation chart.js. [Ofitsiyna dokumentatsiya chart.js.]. URL: https://www.chartjs.org/docs/latest/

УДК 004 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.10

Г. В. ВЕСЕЛОВСЬКА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-2896-0460

М. Ф. ПЛАХОТНЮК
аспірант кафедри комп'ютерних систем та мереж
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0001-0790-3849

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ УДОСКОНАЛЮВАННЯ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ СИСТЕМАМИ КОМП'ЮТЕРНО-ОРІЄНТОВАНОГО НАВЧАННЯ З ІНТЕНСИВНИМ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕРЕЖНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ЗАСАДАХ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТОДОЛОГІЇ СИСТЕМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Розглянуто актуальні питання вдосконалювання систем комп'ютерно-орієнтованого навчання, що відіграють важливу роль у підвищенні ефективності сучасних освітніх процесів. Дослідження було спрямоване на вирішення актуального завдання розробки такої концептуальної моделі вдосконалювання методів управління складними системами комп'ютерно-орієнтованого навчання з інтенсивним застосуванням мережних інформаційних технологій, що створить підґрунтя для посилення стабільності функціонування зазначених систем в умовах підвищеної ймовірності виникнення дестабілізуючих чинників і ситуацій. Спираючись на результати проведеного аналізу, за найдоцільніший підхід до розробки концептуальної моделі вдосконалювання методів управління досліджуваними системами, було вибрано застосування елементів методології систем штучного інтелекту. Мети дослідження було досягнуто шляхом введення до моделі управління системою комп'ютерно-орієнтованого навчання спеціалізованих додаткових компонент, формалізованих у виді низки взаємопов'язаних інтелектуальних сценаріїв із інтерактивними можливостями. Зазначені сценарії було спрямовано на адаптивну експертну підтримку прийняття оптимізованих інтегрованих рішень стосовно вибору режимів роботи, видів і протоколів діяльності, інформаційного забезпечення системи комп'ютерно-орієнтованого навчання та її користувачів залежно від типів наявних або прогнозних збоїв і відмов системи. Було введено до розгляду шість типів спеціалізованих інтерактивних інтелектуальних сценаріїв підсистеми управління навчальними процесами складної мережної комп'ютерно-орієнтованої системи дистанційного навчання, визначено їхні функції та ієрархічну підпорядкованість. Указані сценарії надають можливість гнучко формувати оптимальні моделі стабілізації функціонування системи та діяльності її користувачів у позаштатних ситуаціях, дотримуючись критеріїв мінімізації інформаційної та часової надлишковості.

Ключові слова: *комп'ютерно-орієнтоване навчання, складна система, метод управління, штучний інтелект, мережна інформаційна технологія, методологія, концептуальна модель.*

G. V. VESELOVSKAYA
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Computer Systems and Networks
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-2896-0460

M. F. PLAKHOTNIUK
Postgraduate Student at the Department of Computer Systems and Networks
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0001-0790-3849

THE CONCEPTUAL MODEL FOR IMPROVEMENT IN CONTROL METHODS OF COMPLEX SYSTEMS ON COMPUTER-ORIENTED TRAINING WITH INTENSIVE USE OF NETWORK INFORMATION TECHNOLOGIES ON THE BASIS OF ELEMENTS IN THE METHODOLOGY OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS

The topical issues for improvement of systems on computer-oriented training that play an important role in increasing the efficiency of modern educational processes are considered. The research was aimed at solving the topical task of developing such a conceptual model for improvement in control methods of complex systems on computer-oriented

training with intensive use of network information technologies that create the basis for strengthening the stability in the functioning of these systems in conditions of increased probability for the emergence of destabilizing factors and situations. Based on the results of the conducted analysis, for the most appropriate approach to the development of a conceptual model for improvement in control methods of researching systems was choose using the elements in the methodology of artificial intelligence systems. The purpose of the research was achieved by entering in the control model for the system on computer-oriented training of the specialized additional components formalized in a number of interrelated intellectual scenarios with interactive possibilities. These scenarios were aimed at adaptive expert support for making optimized integrated decisions regarding the choice of work modes, types and protocols of activity, information support for the system on computer-oriented training and its users according to the types of available and predictive malfunction of the system. Six types of specialized interactive intellectual scenarios for subsystem on control of education processes in complex network computer-oriented system of distance training were entered for consideration, their functions and hierarchical subordination was determined. The specified scenarios make it possible to flexibly form optimal models for stabilization in the functioning of the system and activity of its users in freelance situations by following the criteria for minimizing information and time excess.

Key words: *computer-oriented training, complex system, control method, artificial intelligence, network information technology, methodology, conceptual model.*

Постановка проблеми

У плині еволюції теоретичних і практичних підходів до вдосконалювання методів і засобів навчання, одне з чільних місць міцно посіла технологія комп'ютерно-орієнтованого навчання, що має великий потенціал і постійно надалі розвивається на підґрунті досягнень науково-технічного прогресу та відповідного підвищення запитів економіки та суспільства до підготовки фахівців. При цьому, надзвичайно важливу роль відіграє досягнення максимально можливої ефективності управління системами комп'ютерно-орієнтованого навчання, що теж постійно вдосконалюється, спираючись на новітні досягнення теорії управління.

Сучасні системи комп'ютерно-орієнтованого навчання, що мають тісно інтегруватися з прогресивними мережними інформаційними технологіями, мають низку властивостей складних систем, що містять численні елементи та зв'язки, наділені суттєвою динамічністю, потребують обробки значних обсягів недостатньо повної та точної інформації тощо. Відповідно, актуальним є застосування до систем комп'ютерно-орієнтованого навчання методів і засобів теорії управління складними системами. В першу чергу, мова йде про використання потужного потенціалу тих методів і засобів, що базуються на елементах методології систем штучного інтелекту.

Незважаючи на численні дослідження науковців і практиків, у зазначеній сфері залишається багато недостатньо опрацьованих питань. Зокрема, потребують ретельного дослідження та оптимального вирішення проблеми ефективного управління складними мережними системами комп'ютерно-орієнтованого навчання в умовах виникнення, в ході функціонування цих систем, позаштатних ситуацій, що здійснюють дестабілізуючий вплив.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

За результатами проведеного аналізу, можна зробити висновок стосовно існування двох альтернативних чинників, що свідчать про наявність як потужних позитивних впливів, так і суттєвих проблемних аспектів, котрі продукуються системами комп'ютерно-орієнтованого навчання, здійснюваного на засадах інтенсивного застосування сучасних мережних інформаційних технологій.

Із однієї сторони, наявність великої чисельності та різноманіття ефективних форм і технологій навчання в зазначених системах, а також їхня доступність для практичної реалізації та достатня нескладність в опановуванні, є сталим потужним підґрунтям і неперервним каталізатором подальшого вдосконалювання освітніх процесів [1–11]. Із іншого боку, високий рівень складності систем комп'ютерно-орієнтованого навчання, що характеризуються інтенсивним застосуванням мережних інформаційних технологій, обумовлює необхідність вирішення низки проблем [12–15]. Зокрема, мова йде про актуальні проблеми вдосконалювання управління цими системами, пов'язані з необхідністю оптимізації інформаційних обсягів і часових витрат в умовах високої ймовірності впливів на системи дестабілізуючих чинників.

На даний час, означені проблеми ще недостатньо вивчені та потребують системних досліджень і розробок. При цьому, в якості визначального формального апарату моделювання найдоцільніше застосовувати елементи методології систем штучного інтелекту, що дозволяє ефективно обробляти переважну більшість аспектів побудови та функціонування систем, пов'язаних з їхньою складністю.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження полягає у формуванні такої концептуальної моделі вдосконалювання методів управління складними системами комп'ютерно-орієнтованого навчання з інтенсивним застосуванням мережних інформаційних технологій, що створить підґрунтя для посилення стабільності функціонування зазначених систем в умовах підвищеної ймовірності виникнення дестабілізуючих чинників і ситуацій, застосовуючи, при цьому, за основу елементи методології систем штучного інтелекту.

Викладення основного матеріалу дослідження

Особливості еволюції, сучасний стан, перспективні тенденції та вимоги щодо подальшого розвитку науково-технічного прогресу обумовили високу актуальність застосування комп'ютерно-орієнтованого навчання в перебігу підготування та здійснення практично всіх процесів освітньої діяльності, включаючи самоосвіту. Зокрема, дуже важливе місце посів мережний формат втілення зазначеного підходу до навчання. В підсумку, технології комп'ютерно-орієнтованого навчання набули масового поширення та активного застосування в закладах освіти, на підприємствах і в організаціях, серед численних і різноманітних верств корпоративних і персональних користувачів комп'ютерних і телекомунікаційних систем і мереж тощо. Більше того, технології комп'ютерно-орієнтованого навчання стали потужним підґрунтям для отримання плідних результатів такої діяльності: повномасштабної цифровізації сфери освіти; високоефективного втілення стратегій навчання протягом усього життя; всебічного самовдосконалювання кожної особистості, зокрема, в царині так званих м'яких навичок; зростання цінності людського капіталу; зміцнення ринку праці та повноцінного задоволення його потреб у фахівцях високого рівня кваліфікації. В цілому, все це сприяло як вдосконалюванню соціально-економічних процесів, так і виходу підприємництва, бізнесу та економічної діяльності в цілому на якісно та кількісно новий рівень.

Концепції, засоби та методи комп'ютерно-орієнтованого підходу до здійснення навчання знайшли своє успішне втілення в підтримці забезпечення належної підготовки, перепідготовки та підвищення кваліфікації всіх категорій фахівців, на всіх рівнях освіти та в усіх форматах викладання та вивчання. При цьому, комп'ютерно-орієнтованим навчанням було охоплено фактично всі напрямки освітньої діяльності. Охарактеризуємо надалі визначальні напрямки застосування комп'ютерно-орієнтованого навчання в зазначеній діяльності.

Серед провідних напрямків освітньої діяльності, де стало надзвичайно плідним втілення комп'ютерно-орієнтованого навчання, слід особливо відзначити комп'ютеризацію тих систем і процесів викладання та вивчання, що реалізуються безпосередньо в закладах освіти або на базі інших об'єктів діяльності, офіційно сертифікованих для надання освітніх послуг (спеціалізованих відділів підприємств, організацій та установ; центрів; платформ; спілок; курсів: гуртків тощо). Зокрема, як показала практика, комп'ютерно-орієнтованим навчанням було ефективно підтримано ті освітні процеси, що здійснюються в перебігу опановування навчальних курсів, написання курсових робіт і проєктів, виконання розрахунково-графічних і контрольних робіт, проходження навчальних, виробничих і передатестаційних практик, виконання випускних кваліфікаційних робіт і т. і.

Ще одним ключовим напрямком освітньої діяльності, що був ефективно підтриманий за допомогою інструментарію комп'ютерно-орієнтованого навчання, стала попередньо планована фахова підготовка, підвищення кваліфікації та перепідготовка працівників підприємств та організацій, здійснювана в таких основних організаційних форматах: безпосередньо на робочому місці; з відривом від робочого місця та виробничих процесів, але в межах того підприємства (організації), що є роботодавцем; із відривом від виробництва тощо.

Третій напрямок інтенсивного застосування комп'ютерно-орієнтованого навчання в освітній діяльності охопив процеси здобування професійної самоосвіти, що здійснюється без відриву від виробництва та розв'язуваних професійних задач у разі виникнення відповідної поточної об'єктивної виробничої необхідності. Як правило, мова йде про потребу в отриманні додаткових фахових і загальних компетентностей, що реалізується за власною ініціативою працівника чи певної групи (колективу) працівників, з метою досягнення ефективнішого вирішення поточних або запланованих на перспективу завдань основної виробничої діяльності на підприємствах, в організаціях, установах, агенціях, офісах тощо. Найчастіше, зазначений напрямок комп'ютерно-орієнтованої освітньої діяльності здійснюється на засадах так званої неформальної чи інформальної освіти.

Четвертий напрямок упровадження технологій комп'ютерно-орієнтованого навчання до освітніх процесів передбачає різноманітні формати самонавчання окремих користувачів або спільнот користувачів, поєднаних певними освітніми потребами, в домашніх умовах або в середовищах різноманітних об'єднань за інтересами, на засадах використання електронних інформаційних джерел.

На даний час, технології здійснення комп'ютерно-орієнтованого навчання набули найрізноманітніших форм і проявів, що активно використовуються на практиці. Серед них, найбільшої популярності набули методи та засоби технологій дистанційного навчання, електронного навчання (e-Learning), мобільного навчання (m-Learning) тощо. Прогресивним стало застосування в комп'ютерно-орієнтованому навчанні технологій хмарних сервісів, соціальних мереж, месенджерів, освітніх платформ, штучного інтелекту, Internet of Things (IoT), Bring Your Own Device (BYOD) і т. і.

Слід відзначити, що технології комп'ютерно-орієнтованого навчання знайшли плідне застосування фактично на всіх етапах здійснення освітньої діяльності. Вони охопили своєю підтримкою вирішення ключових завдань таких освітніх процесів, як: а) управління освітньою діяльністю, з наданням можливості здійснення підтримки різноманітних прямих і зворотних зв'язків; б) підготування навчального процесу (зокрема, з можливістю використання як технологічних засобів універсального призначення, так і спеціалізованих автоматизованих робочих місць); в) викладання навчальних дисциплін у режимі аудиторної роботи з можливістю застосування підсиленої візуальної та комунікаційної підтримки (в тому числі, з використанням наочного віртуального мультимедійного,

гіпермедійного, інтерактивного, статичного та динамічного, двовимірного та тривимірного контенту); г) вивчання електронних навчальних курсів здобувачами освіти на засадах самостійної та індивідуальної роботи (зокрема, під керівництвом викладача), з наданням можливості отримання безпосереднього та цілодобового дистанційного доступу до попередньо сформованих електронних баз, банків і сховищ ілюстрованих навчально-методичних матеріалів; д) керівництво практичною підготовкою, а також контрольними, розрахунково-графічними, курсовими та випускними атестаційними роботами здобувачів освіти на основі запровадження відповідних електронних навчальних курсів, із можливостями дистанційного доступу до них; е) формування адаптивних, індивідуалізованих і персоніфікованих, траєкторій навчання здобувачів освіти, з можливостями гнучкого динамічного налаштовування в режимі реального часу, зокрема, на засадах використання інтелектуальних сценаріїв; ж) опановування курсів у сфері неформальної та інформальної освіти на підґрунтях дистанційного комп'ютерно-орієнтованого навчання (зокрема, з використанням можливостей спеціалізованих дистанційних освітніх платформ, порталів та інших ресурсів Web із безкоштовним режимом доступу до певних курсів); з) здійснення самоосвіти за персональними програмами та часовими графіками навчання, ініційованими безпосередньо тими, хто навчається, на засадах дистанційного комп'ютерно-орієнтованого навчання.

Нинішній стан світових соціально-економічних процесів і прогнози їхнього подальшого розвитку обумовили особливу, посилену увагу до дистанційного формату здійснення процесів комп'ютерно-орієнтованого навчання. Основним підґрунтям зазначеної активної уваги стало те, що комп'ютерно-орієнтоване дистанційне навчання надає потужні та зручні додаткові (нерідко, єдині) можливості здобуття освіти й отримання кваліфікації за вибраним фахом численним верствам населення. А саме, мова йде про ті категорії здобувачів освіти, які характеризують певні специфічні обставини, вимоги й умови життєдіяльності, що об'єктивно не дозволяють їм брати участь у звичайному освітньому процесі. У першу чергу, до зазначених верств населення належать ті, що мають характеристики, представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Ключові категорії чинників, що формують потребу осіб у дистанційному комп'ютерно-орієнтованому навчанні

№	Найменування категорії чинників
1	Суттєва територіальна віддаленість від місць розташування потрібних закладів освіти
2	Специфічні умови довкілля, вимоги робочого середовища та виконуваних робочих завдань, риси особистості, фізіологічні особливості, стан здоров'я, сімейні та інші життєві обставини
3	Наявність особливих потреб щодо організації освітнього процесу та здійснення освітньої діяльності
4	Потреба в гнучких персоніфікованих підходах до формування календарно-тематичних графіків і часових термінів проходження навчальних курсів

Найчастіше зазначену специфіку обумовлено такою низкою об'єктивних підстав, пов'язаних із конкретною особою, що прагне здобувати освіту, як: наявність вроджених або набутих протягом життя важких хронічних хвороб, травм, інвалідності; тимчасово ускладнений стан здоров'я, що спричинив суттєві фізичні обмеження, потребує тривалого часу для відновлення (видужання, реабілітації тощо), а також вимагає жорсткої територіальної прив'язки до місць лікування; вагітність, пологи та післяпологовий догляд за дитиною; необхідність частих, далеких і тривалих відряджень, дотримання ізольованого, вахтового та позмінного характеру роботи, а також урахування інших обставин, обумовлених специфічними посадовими обов'язками та фаховими вимогами до працюючих осіб певних професій і видів діяльності; потреба в дотриманні визначеного усталеного способу життя (наприклад, є дуже характерною для домогосподарок); тривале перебування в ситуації форс-мажорних обставин або їхніх наслідків тощо. Важливо також відзначити, що глобальне превалювання дистанційного навчання неодноразово мало місце під час епідемій та пандемій інфекційних хвороб, великомасштабних проявів стихійних лих тощо.

Одним із головних чинників досягнення високої ефективності комп'ютерно-орієнтованого дистанційного навчання, є його здійснення на засадах посиленого застосування прогресивних мережних інформаційних та інформаційно-комунікаційних технологій. Також важливо відзначити, що повномасштабна реалізація комп'ютерно-орієнтованого дистанційного навчання передбачає інтенсивне використання значних обсягів мультимедійного, гіпермедійного та інтерактивного контенту, як статичного, так і динамічного.

Виходячи з вище сказаного, якісне здійснення дистанційних освітніх процесів вимагає від систем підтримки комп'ютерно-орієнтованого дистанційного навчання (СПКОДН) таких властивостей, як: а) високий рівень сучасності, потужності, продуктивності, гнучкості та адаптивності забезпечення СПКОДН (апаратного, програмного, математичного, інформаційного, лінгвістичного, організаційного та т. і.); б) посилена надійність і безвідмовність СПКОДН, що гарантували би якнайвищі характеристики неперервності та стабільності функціонування цих систем, а також постійності доступу до їхнього ресурсного забезпечення; в) посилена захищеність об'єктів інформаційної комунікації, інформаційних процесів та інформаційних сховищ усередині СПКОДН, а також інформаційної

взаємодії цієї системи з довкіллям; г) максимально висока гнучкість та адаптивність СПКОДН щодо: індивідуальних і персональних особливостей (зокрема, фізіологічних і психологічних характеристик, поточного рівня підготовки у визначеній предметній області, інформаційних потреб і запитів тощо) учасників освітнього процесу, як цільових користувачів цих систем; специфіки організації та функціонування робочих місць зазначених користувачів; довкілля кожного з віртуальних середовищ цих користувачів усередині та назовні системи; д) концептуальне, математичне, логічне та інформаційне моделювання СПКОДН і методів управління ними, як складних систем, що характеризуються: великими масштабами; глибоким рівнем ієрархічності; численними складними елементами та зв'язками між ними; високою ймовірністю виникнення динамічних, зокрема, дестабілізуючих, змін; необхідністю опрацювання суттєвих обсягів неповної та неточної інформації; складним довкіллям тощо.

Важливо відзначити, що практично в будь-яких сучасних системах комп'ютерно-орієнтованого дистанційного навчання, наділених властивостями великих і складних розподілених мережних систем, із необхідністю підтримки неперервного цілодобового режиму функціонування, є об'єктивно можливим виникнення таких ситуацій, що тимчасово, в певних межах, порушують штатні режими функціонування цих систем. Зазначені ситуації можуть виникати як через планові ремонтно-профілактичні або ремонтно-відновлювальні роботи, так і внаслідок появи різноманітних неполадок, обумовлених обставинами форс-мажорного характеру. Причому, зазначені неполадки можуть призводити не тільки до короткочасних і не дуже суттєвих локальних збоїв, а й до глобальних відмов систем, що матимуть значну тривалість і спричинятимуть відчутні негативні впливи. Одним із ключових чинників, спроможних спричинити виникнення таких обставин, є непередбачувані пошкодженнями вузлів і каналів телекомунікаційних мереж зв'язку внаслідок впливу техногенних явищ, природних стихій, людського фактору тощо. Ще одним значимим чинником є суттєвий рівень перевантаженості систем комп'ютерно-орієнтованого дистанційного навчання внаслідок стрімкого зростання чисельності їхніх користувачів у періоди епідемій, пандемій, негод, воєнних станів і т. і. Також важливо взяти до уваги ту обставину, що в умовах воєнних станів, через систематичний вплив дії їхніх руйнівних наслідків, імовірність виникнення в системах комп'ютерно-орієнтованого дистанційного навчання непередбачуваних збоїв і відмов стає особливо підвищеною. До того ж, суттєво зростає ймовірність підвищення їхньої масштабності, тривалості та потужності. Зазначені особливості також є характерними для багатьох ситуацій та процесів, пов'язаних із повоєнним відновленням.

У цілому, окреслені вище особливості тягнуть за собою виникнення та надзвичайну актуальність вирішення низки проблем гарантування стабільної та ефективної практичної реалізації систем комп'ютерно-орієнтованого дистанційного навчання, успішної технологічної та організаційно-методичної підтримки для якісного проведення дистанційних занять, забезпечення повноцінного доступу до системи навчання всіх учасників освітнього процесу тощо.

Відповідно, високої актуальності в системах комп'ютерно-орієнтованого дистанційного навчання, в застосуванні до низки ланок та етапів здійснення освітніх процесів, набули питання всебічного резервування, вирішення котрих дозволяє передбачати, залежно від ситуації, попередження або усування наслідків виникнення в цих системах збоїв і відмов. Зокрема, мова йде про вирішення означених проблем на засадах введення до дистанційних освітніх процесів певних елементів змішаного навчання. Також високо актуальними є питання максимально можливого розвантаження часу аудиторних навчальних занять, що проводяться в перебігу здійснення дистанційного комп'ютерно-орієнтованого навчання, від тієї частки інформації, що характеризується низкою специфічних властивостей, представлених у таблиці 2.

Таблиця 2

Види інформації, котру доцільно вилучити з розгляду при проведенні аудиторних дистанційних комп'ютерно-орієнтованих навчальних занять

№	Характеристика особливостей виду інформації
1	Інформація, що може бути успішно опанована здобувачами освіти або повністю самостійно, або за умови відвідування ними консультацій з самостійної та індивідуальної роботи під керівництвом викладача, за наявності належної додаткової організаційної та інформаційної підтримки
2	Інформація, котра може бути замінена її еквівалентним поданням, що є більш стислим за обсягом і часом відтворення (зокрема, при представленні текстів, статичної та динамічної графіки, мультимедійного та гіпермедійного контенту, інтерактивної компоненти, віртуальної реальності, програмних кодів тощо)
3	Інформація, що не має гарантованої стабільності відображення (наприклад, коли подання інформації вимагає переходу за Internet посиланням, що може бути нестійким або нетривалим, або коли доступ до електронного інформаційного носія не є достатньо надійним тощо)

Для вирішення поставлених проблем, доцільним є введення до підсистеми управління навчальними процесами комп'ютерно-орієнтованої системи дистанційного навчання множини взаємопов'язаних спеціалізованих інтелектуальних сценаріїв із інтерактивними можливостями. Зазначені інтелектуальні сценарії мають бути спрямовані на підтримку здійснення низки ключових типів діяльності, що повинна виконуватись у випадку виникнення певних збоїв або відмов комп'ютерно-орієнтованої системи дистанційного навчання.

Введемо до розгляду таку концептуальну модель:

$$S_U = \{S_{FR}, S_P, S_{OT}, S_{IN}, S_C, S_W\}, \quad (1)$$

де S_U – множина спеціалізованих інтерактивних інтелектуальних сценаріїв підсистеми управління навчальними процесами комп'ютерно-орієнтованої системи дистанційного навчання; S_{FR}, S_P, S_{OT}, S_{IN}, S_C, S_W – складові компоненти множини S, що є її підмножинами та будуть детально охарактеризовані далі за текстом.

Інтелектуальними сценаріями типу S_{FR} має бути підтримана діяльність із ухвалення інтегрованих рішень щодо режимів функціонування комп'ютерно-орієнтованої системи дистанційного навчання в залежності від типу наявних або передбачуваних збоїв і відмов, що набуватимуть такого характеру: а) спричинятимуться негативними зовнішніми впливами на систему; б) виникатимуть через нестабільність роботи модулів забезпечення системи; в) викликатимуться неполадками персональних робочих місць користувачів системи; г) ставатимуться внаслідок неполадок у модулях управління системою; д) здійснюватимуться через дестабілізуючий характер впливу людського чинника. При цьому, мова йде як про можливість вибору режимів функціонування комп'ютерно-орієнтованої системи дистанційного навчання з наявної бібліотеки компонентів, так і про підтримку процесів моделювання та генерації нових рекомендованих режимів функціонування цієї системи.

Інтелектуальними сценаріями типу S_P має бути підтримане формування режимів роботи, планів, рекомендацій та інструкцій щодо діяльності для учасників освітнього процесу в разі виникнення нештатних ситуацій. Для сценаріїв типу S_P, щонайменше, мають бути розглянуті нештатні ситуації таких видів: а) в модулі комунікації системи з її довкіллям; б) у забезпеченні та керуючій ланці системи; в) на персональних робочих місцях учасників освітнього процесу.

Інтелектуальними сценаріями типу S_{OT} має бути підтримане визначення оптимальних групових та індивідуальних траєкторій навчання, виходячи з часового критерію. Зокрема, в інтелектуальних сценаріях типу S_{OT} передбачається необхідність урахування щодо кожного тематичного аудиторного, самостійного чи індивідуального заняття часових меж для: а) виконання окремих ключових етапів і робіт, включаючи здійснення управління навчальним процесом; б) демонстрації мультимедійного контенту; в) представлення окремих складових компонентів мультимедійного контенту (тексту, статичної графіки, анімації, фото, аудіо, відео тощо); г) активації змісту гіпермедійного контенту; д) роботи з інтерактивним контентом; е) взаємодії з Internet технологіями Web сайтів і порталів, інтерактивного відео, віртуальної реальності, 3D світів, хмарних сервісів, Internet of things (IoT), розумного будинку тощо; ж) класичних та активних методів навчання, групової та індивідуальної діяльності, дистанційного та змішаного освітнього формату. При цьому, мова йде про врахування низки типів часових меж: граничних (максимально та мінімально можливих); попередньо планованих; оптимальних.

Інтелектуальними сценаріями типу S_C повинне підтримуватися виконання функцій формування гнучких динамічних часових, інформаційних і ресурсних технологічних карт навчальних занять та освітніх процесів у цілому. Зазначене обумовлене тим, що критично важливу роль у здійсненні комп'ютерно-орієнтованого дистанційного навчання відіграє побудова оптимальної часової, інформаційної та ресурсної структури навчального процесу та управління ним із оперативним врахуванням актуальних змін реального часу.

Інтелектуальними сценаріями типу S_{IN} має підтримуватися виконання таких функцій: моніторинг, аналіз, формування моделей і прогнозування об'єктивних і суб'єктивних інформаційних потреб і запитів учасників навчального процесу; створення інформаційних підґрунть для врахування зазначених потреб і запитів у ході генерації індивідуальних траєкторій навчання та технологічних карт освітніх процесів.

Інтелектуальними сценаріями типу S_W має підтримуватися ведення спеціалізованого Web-сайту, що підтримуватиме комунікацію комп'ютерно-орієнтованої системи дистанційного навчання з Internet-довкіллям.

Ієрархічну підпорядкованість типів спеціалізованих інтерактивних інтелектуальних сценаріїв підсистеми управління навчальними процесами комп'ютерно-орієнтованої системи дистанційного навчання представлено в таблиці 3.

Таблиця 3

Схема рівнів підпорядкованості для базових інтелектуальних сценаріїв множини *S*

<table>
<tr><td>Level 1</td><td colspan="2">S_P</td><td rowspan="4">S_W</td></tr>
<tr><td>Level 2</td><td>S_{OT}</td><td>S_C</td></tr>
<tr><td>Level 3</td><td colspan="2">SIN</td></tr>
<tr><td>Level 4</td><td colspan="2">S_{FR}</td></tr>
</table>

Висновки

У статті розглянуто актуальні питання подальшого вдосконалювання систем, котрі відіграють одну з провідних ролей у забезпеченні високої ефективності сучасних освітніх процесів – систем комп'ютерно-орієнтованого навчання, що функціонують на засадах інтенсивного застосування мережних інформаційних технологій.

Дослідження було спрямоване на вирішення актуального завдання розробки такої концептуальної моделі вдосконалювання методів управління складними системами комп'ютерно-орієнтованого навчання з інтенсивним застосуванням мережних інформаційних технологій, що створить підґрунтя для посилення стабільності функціонування зазначених систем в умовах підвищеної ймовірності виникнення дестабілізуючих чинників і ситуацій. Методологічний інструментарій дослідження був заснований на застосуванні елементів теорії систем, управління складними системами, мережних інформаційних технологій, систем штучного інтелекту.

У перебігу здійснення дослідження, було проаналізовано специфіку, виконано систематизацію та окреслено проблемні питання за низкою тих аспектів предметної галузі сучасних систем комп`ютерно-орієнтованого навчання з інтенсивним застосуванням мережних інформаційних технологій, котрі потенційно можуть обумовити вдосконалювання управління зазначеними системами. При цьому, розгляд виконувався під кутом зору низки специфічних ознак, що є властивими вказаним вище системам, таких як: підвищений рівень загальної складності організації, функціонування та управління; посилена ймовірність впливу на системи й управління ними різноманітних дестабілізуючих чинників, виникнення непередбачуваних проблемних ситуацій технічного характеру, утворення інформаційної надлишковості при жорстких лімітах часових ресурсів. Спираючись на проміжні результати проведеного аналізу, за найдоцільніший підхід до розробки концептуальної моделі вдосконалювання методів управління досліджуваними системами, було вибрано застосування елементів методології систем штучного інтелекту.

За підсумками виконаного дослідження, було запропоновано концептуальну модель удосконалювання методів управління складними системами комп'ютерно-орієнтованого навчання, базованими на інтенсивному застосуванні мережних інформаційних технологій, котра ґрунтується на використанні елементів методології систем штучного інтелекту. Зазначена концептуальна модель надає можливість сформувати підґрунтя для вирішення проблеми підвищення стабільності роботи складних систем комп'ютерно-орієнтованого навчання з інтенсивним застосуванням мережних інформаційних технологій за умов посиленої ймовірності впливу дестабілізуючих обставин. Указаний вище результат досягається шляхом введення до моделі управління системою комп'ютерно-орієнтованого навчання низки додаткових компонентів, формалізованих у виді взаємопов'язаних спеціалізованих інтелектуальних сценаріїв із інтерактивними можливостями, що спрямовані на адаптивну експертну підтримку ухвалення оптимізованих інтегрованих рішень стосовно вибору режимів роботи, видів і протоколів діяльності, інформаційного забезпечення системи та її користувачів залежно від типів наявних або передбачуваних збоїв і відмов системи. Було введено до розгляду шість типів спеціалізованих інтерактивних інтелектуальних сценаріїв підсистеми управління навчальними процесами мережної комп'ютерно-орієнтованої системи дистанційного навчання, визначено їхні функції та ієрархічну підпорядкованість. Зазначені сценарії надають можливість гнучко формувати оптимальні моделі стабілізації функціонування системи та діяльності її користувачів у нештатних ситуаціях, дотримуючись критеріїв мінімізації інформаційної та часової надлишковості.

Список використаної літератури

1. Бохонько Є. О., Шелевер О. В., Дерека К. О. Цифрова трансформація Освіти 4.0: викладання та навчання в епоху цифрових технологій. *Інноваційна педагогіка*. № 60. 2023. С. 219–222. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/innped2023_60_47

2. Higher education in the digital age. Moving academia online / Eds.: A. Zorn, J. Haywood, J. Glachant. Cheltenham, UK, Northampton, MA, USA: Edward Edgar Elgar Publishing. 2018. 170 p.

3. Willcox K. E., Sarma S., Lippel P. H. Online education: a catalyst for higher education reforms. Massachusetts Institute of Technology online education policy initiative Final Report. Cambridge: MIT. 2016. 56 p.

4. Toktogonov S. A., Veselovskaya G. V. etc. The analysis in development prospects for computer-oriented information technologies of the distance learning. *Молодь у світі сучасних технологій / За тематикою: «Сучасні інформаційні технології: стан та перспективи розвитку»* (Україна, м. Херсон, 4 червня 2021 р.): Матеріали *X Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*; збірник наукових праць. Херсон : ФОП «Вишемирський В. С.», 2021. 168 с. С. 78–80.

5. Веселовська Г. В. Удосконалення процесів викладання в сфері вищої освіти на засадах підвищення мотивації навчання шляхом використання мережних інформаційних технологій та спеціальних систем завдань. *Професійний розвиток, удосконалення загальних і професійних компетентностей викладачів вищої школи*: Матеріали Всеукраїнського науково-педагогічного підвищення кваліфікації (8 липня – 18 серпня 2024 року). Львів – Торунь : Liha-Pres, 2024. 164 с. С. 17–21. ISBN 978-966-397-416-3.

6. Веселовська Г. В. Роль інформаційних систем і технологій комп'ютерно-орієнтованого навчання як каталізатору зростання якості регіонального людського капіталу в повоєнних умовах. *Синергія науки і бізнесу у повоєнному відновленні Херсонщини / Секція 2 – Роль інформаційних систем і технологій у повоєнному відновленні регіональної економіки*: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (Україна, Херсонський наці-

ональний технічний університет, 26-28 квітня 2023 р.): у 2-х т. Т. 1 / за ред. О. В. Чепелюк. Одеса: Олді+, 2023. 456 с. С. 204–207. ISBN 978-966-289-730-2; ISBN 978-966-289-731-9 (Т. 1).

7. Винницька Н., Жигайло О. Особливості застосування мультимедіа-технологій в сучасній системі освіти. *Молодь і ринок*. № 2. 2023. С. 109–112. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mir_2023_2_22

8. Siwocha A., Veselovskaya G. V. The analysis in the features of application for computer multimedia information technologies of learning. *Молодь у світі сучасних технологій / За тематикою: «Сучасні інформаційні технології: стан та перспективи розвитку»* (Україна, м. Херсон, 4 червня 2021 р.): Матеріали *X Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*; збірник наукових праць. Херсон : ФОП «Вишемирський В. С.», 2021. 168 с. С. 71–72.

9. Добровіцька О. О., Лучко Ю. І. Застосування хмарних технологій в освітньому процесі закладів вищої освіти. *Education and pedagogical sciences*. № 2. 2023. С. 62–70. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/OsDon_2023_2_8

10. Галицький О. В., Микитенко П. В., Малюх Є. В. Організація дистанційного та змішаного навчання в закладах вищої освіти засобами хмарних сервісів. *Наукові записки Центральноукраїнського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка*. *Педагогічні науки*. № 208. 2023. С. 106–111. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nz_p_2023_208_19 7

11. Веселовська Г. В. Застосування систем штучного інтелекту до підвищення продуктивності розроблення викладачами курсів комп'ютеризованого дистанційного навчання на засадах сучасних мережних інформаційних технологій. *Технології доброчесного використання штучного інтелекту у сфері освіти та науки*: Матеріали Всеукраїнського науково-педагогічного підвищення кваліфікації (*Україна, м. Полтава, 31 липня – 10 вересня 2023 року*). Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2023. 276 с. С. 47–50. ISBN 978-617-554-171-5.

12. Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V. Trainer and trainees modeling based on complex information approach to improvement of training information technologies and systems. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. № 2(49). 2019. P. 119–130. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-2-13

13. Kunaev V. A., Veselovskaya G. V. etc. The research in the problematics of the current state for computer-oriented information technologies of the distance learning. *Молодь у світі сучасних технологій / За тематикою: «Сучасні інформаційні технології: стан та перспективи розвитку»* (Україна, м. Херсон, 4 червня 2021 р.): Матеріали *X Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*; збірник наукових праць. Херсон : ФОП «Вишемирський В. С.», 2021. 168 с. С. 42–44.

14. Веселовська Г. В. Дослідження доцільних напрямків і проблемних аспектів застосування технологій і систем штучного інтелекту в сфері вищої освіти. *Штучний інтелект у вищій освіті: ризики та перспективи інтеграції*: Матеріали Всеукраїнського науково-педагогічного підвищення кваліфікації (1 липня – 11 серпня 2024 року). Львів – Торунь : Liha-Pres, 2024. 328 с. С. 43–47. ISBN 978-966-397-412-5.

15. Веселовська Г. В. Підходи до підвищення ефективності підготовки ІТ-фахівців за умов воєнного стану та повоєнного відновлення регіональної економіки. *Синергія науки і бізнесу у повоєнному відновленні регіонів України*: Матеріали ІІ Міжнародної науково-практичної конференції (ХНТУ, 24–26 квітня 2024 року): у 3-х т. / за ред. О. В. Чепелюк. Одеса: Олді+, 2024. Т. 2. 420 с. С. 128–130.

References

1. Bokhonko Ye. O., Shelever O. V., Dereka K. O. (2023) Tsyfrova transformatsia Osvity 4.0: vykladannia ta navchannia v epokhu tsyfrovykh tekhnolohii [The digital transformation of the Education 4.0: the teaching and the learning in the age of digital technologies]. *Innovatsiina pedahohika*. no. 60. S. 219–222. [in Ukrainian]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/innped2023_60_47

2. Zorn A., Haywood J., Glachant J. (Eds.) (2018) Higher education in the digital age. Moving academia online. Cheltenham, UK, Northampton, MA, USA: Edward Edgar Elgar Publishing. 170 p.

3. Willcox K. E., Sarma S., & Lippel P. H. (2016) Online education: a catalyst for higher education reforms. Massachusetts Institute of Technology online education policy initiative Final Report. Cambridge: MIT. 56 p.

4. Toktogonov S. A., Veselovskaya G. V. etc. (2021) The analysis in development prospects for computer-oriented information technologies of the distance learning. *Molod u sviti suchasnykh tekhnolohii / Za tematykoiu: "Suchasni informatsiini tekhnolohii: stan ta perspektyvy rozvytku"* (Ukraina, m. Kherson, 4 chervnia 2021 r.): Materialy X Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh; zbirnyk naukovykh prats. Kherson : FOP "Vyshemyrskyi V. S.". 168 s. S. 78–80.

5. Veselovska H. V. (2024) Udoskonalennia protsesiv vykladannia v spheri vyschoi osvity na zasadakh pidvyschennia motyvatsii navchannia shliakhom vykorystannia merezhnykh informatsiinykh tekhnologii ta spetsialnykh system zavdan [The improvement of teaching processes in the field of higher education on the basis of increasing learning motivation through the use of network information technologies and special systems of tasks]. *Profesiinyi rozvytok, udoskonalennia zahalnykh i profesiinykh kompetentnostei vykladachiv vyschoi shkoly* (8 lypnia – 18 serpnia 2024 roku): Materialy

Vseukrainskoho naukovo-pedahohichnoho pidvyschennia kvalifikatsii. Lviv – Torun : Liha-Pres, 2024. 164 s. S. 17–21. [in Ukrainian]. ISBN 978-966-397-416-3.

6. Veselovska H. V. (2023) Rol informatsiinykh system i tekhnologii kompiuterno-oriientovanoho navchannia yak katalizatoru zrostannia yakosti rehionalnoho liudskoho kapitalu v povoiennykh umovakh [The role of information systems and technologies for computerno-oriented learning as a catalyst for increase on quality of the regional human capital in post-war conditions]. *Synerhia nauky i biznesu u povoiennomu vidnovlenni Khersonschyny / Sektsia 2 – Rol* informatsiinykh system i tekhnologii *u povoiennomu vidnovlenni rehionalnoi ekonomiky*: Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (Ukraina, Khersonskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet, 26-28 kvitnia 2023 r.): u 2-kh t. T. 1 / za red. O. V. Chepeliuk. Odesa: Oldi+, 2023. 456 s. S. 204-207. ISBN 978-966-289-730-2; ISBN 978-966-289-731-9 (T. 1).

7. Vynnytska N., Zhyhailo O. (2023) Osoblyvosti zastosuvannia multymedia-tekhnolohii v suchasnii systemi osvity [Peculiarities of using multimedia technologies in the modern education system]. *Molod i rynok*. no. 2. pp. 109–112. [in Ukrainian]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mir_2023_2_22

8. Siwocha A., Veselovskaya G. V. (2021) The analysis in the features of application for computer multimedia information technologies of learning. *Molod u sviti suchasnykh tekhnolohii* / *Za tematykoiu: "Suchasni informatsiini tekhnolohii: stan ta perspektyvy rozvytku"* (Ukraina, m. Kherson, 4 chervnia 2021 r.): Materialy X Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh; zbirnyk naukovykh prats. Kherson : FOP "Vyshemyrskyi V. S.". 168 s. S. 71–72.

9. Dobrovitska O. O., Luchko Yu. I. (2023) Zastosuvannia khmarnykh tekhnolohii v osvitnomu protsesi zakladiv vyzshoi osvity [The application of cloud technologies in the educational process of higher education institutions]. *Education and pedagogical sciences*. no. 2. pp. 62–70. [in Ukrainian]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/OsDon_2023_2_8

10. Halytskyi O. V., Mykytenko P. V., Maliukh Ye. V. (2023) Orhanizatsia dystantsiinokho ta zmishanoho navchannia v zakladakh vyzshoi osvity zasobamy khmarnykh servisiv [The establishment of the distance and mixed learning in institutions of the higher education by means of cloud services]. *Naukovi zapysky Tsentralnoukrainskokho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Vynnychenka. Pedahohichni nauky*. no. 208. pp. 106–111. [in Ukrainian]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nz_p_2023_208_19 7

11. Veselovska H. V. (2023) Zastosuvannia system shtuchnoho intelektu do pidvyschennia produktyvnosti rozroblennia vykladachamy kursiv komputeryzovanoho dystantsiinoho navchannia na zasadah suchasnykh merezhnykh informatsiinykh technolohii [The application of artificial intelligence systems to improving productivity in development of courses for computerizied distance learning by teachers on the basis of modern network information technologies]. *Tekhnolohii dobrochesnoho vykorystannia shtuchnoho intelektu u cpheri osvity ta nayky*: Materialy Vseukrainskoho naukovo-htdahohichnoho pidvyschennia kvalifikatsii (*Ukraina, m. Poltava, 31 lypnia – 10 veresnia 2023 roku*). Odesa : Vydavnychyi dim "Helvetyka", 2023. 276 c. S. 47–50. [in Ukrainian]. ISBN 978-617-554-171-5.

12. Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., & Veselovskaya G. V. (2019) Trainer and trainees modeling based on complex information approach to improvement of training information technologies and systems. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, no. 2(49), pp. 119–130. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-2-13

13. Kunaev V. A., Veselovskaya G. V. etc. (2021) The research in the problematics of the current state for computer-oriented information technologies of the distance learning. *Molod u sviti suchasnykh tekhnolohii* / *Za tematykoiu: "Suchasni informatsiini tekhnolohii: stan ta perspektyvy rozvytku"* (Ukraina, m. Kherson, 4 chervnia 2021 r.): Materialy X Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh; zbirnyk naukovykh prats. Kherson: FOP "Vyshemyrskyi V. S.". 168 s. S. 42–44.

14. Veselovska H. V. (2024) Doslidzhennia dotsilnykh napriamkiv i problemnyikh aspektiv zastosuvannia tekhnologii i system shtuchnoho intelektu v sphere vyschoi ocvity [The research in appropriate directions and problematic aspects on the use of technologies and systems of artificial intelligence in the field of higher education]. *Shtuchnyi intelekt u vyschii osviti: ryzyky ta perspektyvy intehratsii*: Materialy Vseukrainskoho naukovo-htdahohichnoho pidvyschennia kvalifikatsii (1 lypnia – 11 serpnia 2024 roku). Lviv – Torun: Liha-Pres, 2024. 328 s. S. 43–47. [in Ukrainian]. ISBN 978-966-397-412-5

15. Veselovska H. V. (2024) Pidkhody do pidvyschennia ephektyvnosti pidhotovky IT-phakhivtsiv za umov voennoho stanu ta povoennoho vidnovlennia rehionalnoi ekonomiky [The approaches to increase the efficiency of IT-spesialists training under conditions of the martial law and post-war reconstruction of the regional economics]. *Synerhia nauky i biznesu u povoiennomu vidnovlenni* rehioniv Ukrainy: Materialy II Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (KhNTU, 24–26 kvitnia 2024 roku): u 3-kh t. / za red. O. V. Chepeliuk. Odesa : Oldi+, 2024. T. 2. 420 s. S. 128–130. [in Ukrainian].

УДК 004.94 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.11

О. К. ВИШНЕВСЬКИЙ
асистент кафедри програмного забезпечення
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0009-0005-4857-9669

Л. М. ЖУРАВЧАК
доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
професор кафедри програмного забезпечення
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0002-1444-5882

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В РОЗУМНИХ БУДІВЛЯХ ЗА ДОПОМОГОЮ СТРАТЕГІЙ КОНТРОЛЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ

У дослідженні розглянуто застосування стратегій керування для зниження енергоспоживання будівель. Згідно аналізу наявних публікацій більшість науковців застосовували або складні методи на основі моделей, або менш ефективні підходи з Q-learning. У роботі запропоновано новий підхід до регулювання системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря у адміністративних будівлях середнього розміру, що базується на інтелектуальному контролері з підкріпленням, розробленому на основі алгоритму проксимальної політики оптимізації політики (Proximal Policy Optimization), який не вимагає опису моделі. Методологія дослідження поєднує використання симуляцій у середовищі EnergyPlus, які дають змогу точно і динамічно відтворювати поведінку системи за різних сценаріїв управління. В дослідженні ми розглянули регулювання температури подачі повітря до системи. З метою удосконалення підходу керування спроєктовано симуляційне середовище за допомогою бібліотеки Gymnasium, яка є ефективною платформою для реалізації та оптимізації алгоритмів навчання з підкріпленням (Reinforcement learning). На відміну від класичних методів оптимізації, що потребують точного математичного опису фізичних процесів, глибинне навчання з підкріпленням формує дії керування на основі спостереження залежностей між попередніми діями та їх впливом на стан системи. Ефективність розробленого контролера на основі глибинного навчання з підкріпленням порівняно з класичним методом керування на основі стратегії коригування температури подачі повітря відповідно до температури зовнішнього середовища. Отримані результати засвідчили суттєве зменшення енергоспоживання на 27,8 %, при забезпеченні належного мікроклімату в приміщеннях за такими показниками, як температура, вологість і концентрація CO_2. *Запропонований підхід демонструє перспективу застосування методів навчання з підкріпленням для реалізації ефективних стратегій керування, що можуть бути впроваджені у реальних системах керування будівлями.*

Ключові слова: *навчання з підкріпленням, енергоефективність, навантаження, будівля, керування, агент, оптимізація.*

O. K. VYSHNEVSKYY
Assistant at the Department of Software Engineering
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0009-0005-4857-9669

L. M. ZHURAVCHAK
Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow,
Professor at the Department of Software Engineering
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0002-1444-5882

ADVANCED CONTROL STRATEGIES USING DEEP REINFORCEMENT LEARNING FOR IMPROVING ENERGY EFFICIENCY IN SMART BUILDINGS

This research investigates building control strategies for decreasing the energy consumption. A review of existing literature indicates that prior studies employed either complex, model-based approaches or relatively less efficient Q-learning techniques. To address these limitations, we propose a novel control method for Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems in medium-sized office buildings, utilizing an intelligent reinforcement learning controller grounded in the model-free Proximal Policy Optimization algorithm (PPO). Our approach incorporates simulations conducted in the EnergyPlus environment, which allows for a precise and responsive depiction of HVAC system dynamics under various control conditions. A key aspect of the study is the regulation of supply air temperature.

To support the implementation and enhancement of our control strategy, we developed a co-simulation framework using the Gymnasium library. This environment served as a robust foundation for testing and fine-tuning reinforcement learning models. The performance of the proposed deep reinforcement learning-based controller was benchmarked against a conventional control strategy that adjusts supply air temperature based on outdoor air conditions. Experimental results showed a significant 27.8 % reduction in energy use, all while preserving indoor comfort in terms of temperature, humidity, and carbon dioxide levels. This work highlights the potential of reinforcement learning to simplify the deployment of advanced control techniques in real-world building energy management systems. Unlike traditional optimization methods that require detailed mathematical models of the system, deep reinforcement learning infers optimal control actions by analyzing the relationship between system states and the outcomes of selected actions.

Key words: *reinforcement learning, energy efficiency, load, building, control, agent, optimization.*

Постановка проблеми

Будівлі є одним із основних споживачів енергії та джерел викидів вуглекислого газу, на них припадає біля 30 % загального споживання порівняно з іншими секторами. Оскільки більшість наявних будівель залишатиметься в експлуатації і надалі, зменшення енергоспоживання у цих спорудах є важливим завданням для досягнення кліматичних цілей. Поточні стратегії передбачають значне підвищення темпів реновації для забезпечення енергоефективності, однак реалізація цих планів є складною задачею, що робить заплановані показники недосяжними без впровадження нових підходів.

Системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (Heat, Ventilation, and Air Conditioning, HVAC) відіграють ключову роль у забезпеченні комфортних умов у приміщеннях, водночас вони істотно впливають на загальне енергоспоживання будівлі. Проте завдяки ефективному управлінню енергоресурсами будівлі можуть не лише зменшити власне споживання, а й брати активну участь у програмах гнучкого енергоспоживання. Це передбачає перенесення використання енергії на періоди поза піковими навантаженнями, зниження максимального споживання та стабілізацію енергомережі.

Методи управління енергоспоживанням на основі моделей, зокрема модельно-прогнозне керування (Model Predictive Control, MPC), використовують математичні представлення теплових характеристик будівлі та її взаємодії з навколишнім середовищем. Однак такі підходи можуть спричиняти похибки та складнощі при застосуванні до різних будівель або в умовах, що відрізняються від початкових параметрів.

На відміну від цього методи безмодельного керування не потребують попередньої інформації про фізичні характеристики будівлі, а натомість формують свої стратегії шляхом безпосереднього навчання на основі отриманих даних та зворотного зв'язку. Одним із таких підходів є навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL), яке дає змогу створювати гнучкі та стійкі системи управління енергоспоживанням. У RL агент (контролер гнучкого керування) визначає оптимальну послідовність дій, аналізуючи попередній досвід методом проб і помилок, а не покладаючись на попередньо запрограмовані правила. Ця безмодельна властивість робить RL перспективним для розв'язання задач керування та оптимізації навіть у випадках, коли система недостатньо вивчена або доступна інформація є обмеженою. Глибоке навчання з підкріпленням (Deep Reinforcement Learning, DRL) поєднує методи глибокого навчання та RL. Використання глибоких нейронних мереж (Deep Neural Network, DNN) дає змогу агенту виявляти складні закономірності та приймати оптимальніші рішення.

Традиційні системи HVAC у будівлях зазвичай базуються на статичних алгоритмах керування, що використовують фіксовані порогові значення та прості евристичні правила. Такі підходи обмежують можливості оптимізації енергоспоживання. Натомість сучасні методи, зокрема, MPC та DRL, демонструють значний потенціал порівняно з традиційними правилами керування. Аналізуючи дані, DRL здатний автоматично знаходити приховані закономірності та оптимізувати політики управління. Дослідження показують, що використання як MPC, так і RL дає змогу суттєво знизити енергоспоживання будівель без погіршення комфорту для користувачів. Це підтверджує перспективність таких підходів у створенні більш енергоефективних та стійких будівельних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз останніх досліджень і публікацій продемонстрував ефективність методів прогнозного керування для систем HVAC у зниженні енергоспоживання будівель та забезпеченні гнучкішої роботи інженерних систем. У дослідженні [1] запропоновано простий, доступний і масштабований підхід до реалізації MPC у комерційних будівлях зі застарілим обладнанням як альтернативу традиційним методам, базованим на метеоданих. Для зменшення кількості сенсорів і зниження навантаження на обробку даних система використовує температуру витяжного повітря для оцінки внутрішньої температури. Результати тестування підтвердили ефективність запропонованого підходу, за місяць навесні витрати на енергію знизили на 33 %. Оптимізація використання наявних ресурсів дала змогу покращити температурний контроль, скоротити витрати та інтегрувати будівлю в механізми гнучкого енергоспоживання без необхідності встановлення додаткових сенсорів.

Стратегії керування RL, що не вимагають наявності моделі, дають змогу агенту взаємодіяти з навколишнім середовищем у реальному часі і враховувати невизначеності. У роботі [2] проведено детальний аналіз застосування RL у сфері енергетики, де розглянуто різні підходи, їхні сильні та слабкі сторони. Було встановлено, що

хоча RL здатний підвищити ефективність енергосистем у середньому на 20 %, можливості цього підходу ще не повністю розкриті. Автори зауважили недостатнє використання сучасних методів DRL та надмірну залежність від базових алгоритмів, таких як Q-learning. Незважаючи на перспективність підходів, орієнтованих на дані, інтеграція RL у складні енергетичні системи залишається непростим завданням.

У дослідженні [3] запропоновано інноваційний підхід до управління енергоспоживанням у житлових будинках, що поєднує MPC та RL. Основна мета системи – використання теплових властивостей будівлі та акумуляторних батарей для зміщення енергоспоживання на періоди низьких тарифів і продажу надлишкової сонячної енергії назад у мережу. Для врахування похибок моделювання, невизначеностей метеопрогнозу та змінної поведінки користувачів розроблено параметризовану структуру MPC, яка наближено визначає оптимальну стратегію керування енергоспоживанням. Ця модель постійно вдосконалюється за допомогою модифікованого алгоритму детермінованого актора і критика із затримкою. Моделювання підтвердило, що запропонований метод ефективно балансує між комфортом користувачів і економічною вигодою навіть за умов неточних моделей та мінливих реальних умов.

Традиційні системи HVAC у будівлях здебільшого працюють за строго заданими правилами керування. У роботі [4] розглянуто потенціал навчання з підкріпленням як більш гнучкої та енергоефективної альтернативи. Запропоновано багатоагентну RL-архітектуру для оптимізації роботи HVAC-систем із урахуванням зворотного зв'язку від користувачів щодо теплового комфорту. Для підвищення ефективності навчання досліджено методи спільного використання параметрів між агентами та різні стратегії попереднього навчання. Це суттєво скоротило час, необхідний для набуття агентами ефективних стратегій керування. Отримані результати свідчать, що запропонований підхід дає змогу зменшити енергоспоживання на 6 % для всієї будівлі та до 8 % для окремих приміщень порівняно з традиційними алгоритмами керування. Водночас рівень комфорту для користувачів не лише зберігся, а подекуди навіть перевищив показники базової системи.

У дослідженні [5] запропоновано новий метод оптимізації енергоспоживання та теплового комфорту в будівлях із кількома зонами, що поєднує штучний інтелект та методи управління на основі правил для центрального повітрообробного пристрою. Для впровадження отриманої моделі в реальні системи автоматизації будівель розроблено методику вилучення чітких правил керування із процесу ухвалення рішень агентом. Ці правила пройшли тестування в середовищі моделювання та були порівняні з початковою RL-моделлю та традиційними методами управління відповідно до стандартів. Отримані результати показали, що контролер, створений на основі вилучених правил, досяг майже такого ж рівня енергоефективності, як і агент, базований на штучному інтелекті (ШІ), але при цьому був значно простішим у реалізації. Це підтверджує перспективність поєднання ШІ та керування на основі правил для впровадження передових стратегій управління енергією в реальних умовах.

Непередбачувана поведінка мешканців, зокрема, їхні шаблони використання гарячої води, є значним викликом для оптимізації енергоспоживання будівель. Традиційні системи керування зазвичай використовують консервативні стратегії, що приводить до надмірного споживання енергії. У дослідженні [6] запропоновано систему керування на основі навчання з підкріпленням, здатну адаптуватися до стохастичної поведінки користувачів. Метод базується на безмодельному RL-підході, що дає змогу переносити систему на різні будівлі без необхідності створення точних моделей кожної з них. Агент RL проходить попереднє навчання в режимі офлайн, використовуючи ймовірнісну модель споживання гарячої води для реалістичного відтворення поведінки користувачів та прискорення процесу навчання. Ефективність підходу підтверджено на основі реальних даних із житлового будинку, споживання енергії скоротили приблизно на 20 % порівняно з традиційними методами керування, при цьому зберегли рівень комфорту. Отримані результати підкреслюють потенціал RL-методів у системах управління енергоспоживанням, що враховують динамічну та нестабільну поведінку користувачів.

У роботі [7] досліджено потенціал механізмів гнучкого управління попитом у житлових будинках для зниження енергоспоживання. Автори підкреслюють необхідність повністю автоматизованих систем управління енергією та пропонують підхід, заснований на RL. Оптимізація роботи системи керування енергоспоживанням розглядається як RL-завдання, яке вирішується шляхом кластеризації побутових пристроїв і незалежної оптимізації графіків їхньої роботи. Порівняно з традиційними методами цей підхід має низку переваг: відсутність необхідності явного моделювання задоволеності користувачів, можливість проактивного планування завдань системою, гнучкість у формуванні запитів користувачами та зниження обчислювальної складності. Для перевірки ефективності підходу застосовано алгоритм Q-learning, результати якого продемонстрували перспективність запропонованої методики для розроблення інтелектуальних систем енергоменеджменту в житлових будинках.

У дослідженні [8] запропоновано метод оптимізації енергоменеджменту в розумних будівлях на основі DRL. Розроблено комплексну систему управління енергоспоживанням, яка враховує різні складові, зокрема, зберігання енергії, генерацію електроенергії сонячними панелями, заряджання електромобілів та роботу побутових приладів. Для реалізації стратегії оптимального розподілу ресурсів дослідники застосували Q-learning із урахуванням відповідних обмежень роботи системи. Результати моделювання продемонстрували ефективність підходу: запропонована стратегія DRL не лише задовольняє енергетичні потреби будівлі, а й забезпечує оптимальний

розподіл енергії. Запропонований метод перевершує традиційні алгоритми керування, підтримуючи рівень помилок у межах 10 %.

Традиційні системи управління будівлями стикаються з труднощами опрацювання зростаючих обсягів різнорідних даних, зокрема, від сенсорів та розкладів користувачів. У дослідженні [9] розглянуто проблему управління якістю повітря у приміщеннях за допомогою підходу, що поєднує DRL та семантичні знання. Запропоновано використання онтологічних графів знань для структурованого подання інформації про якість повітря в будівлях та взаємозв'язків між різними факторами, що на неї впливають. Такий підхід забезпечує контекстно-орієнтоване представлення стану будівлі. Отримані семантичні дані інтегруються у Deep Q-learning (DQL) модель, що дає змогу розробити інтелектуальну систему управління будівлею. Така система може ефективно контролювати якість повітря, адаптувати роботу повітрообробних агрегатів до змінних умов та забезпечувати баланс між комфортом мешканців і енергоефективністю. Автори наголошують, що цей підхід спрощує управління будівлею, зменшуючи складність прийняття рішень для операторів об'єкта.

У роботі [10] запропоновано систему управління енергоспоживанням на основі RL для розумних будівель, інтегрованих у «розумну» енергомережу. Така система враховує можливість обміну енергією з мережею, локальну генерацію відновлюваної енергії (наприклад, сонячні панелі), зберігання енергії та заряджання електромобілів із функцією *vehicle-to-grid*. Завдання оптимізації енергоспоживання сформульовано як процес ухвалення рішень Маркова, що включає множину станів, дій, ймовірності переходів та функцію винагороди. Алгоритм Q-learning дає змогу системі навчатися приймати оптимальні рішення щодо розподілу енергії в умовах невизначеності, зокрема, з урахуванням змін попиту, заряджання електромобілів та генерації сонячної енергії. Моделювання на основі реальних даних показало, що запропонований метод знижує витрати на енергію порівняно з традиційними підходами та випадковими рішеннями. Автори зазначають, що ця RL-методика може бути адаптована для різних середовищ, зокрема, мікромереж та промислових об'єктів.

У дослідженні [11] запропоновано багатоагентну систему управління, спрямовану на оптимізацію комфорту в будівлях та підвищення енергоефективності. Її структура включає три незалежні агенти, кожен із яких відповідає за певний аспект внутрішнього середовища: якість повітря, візуальний та тепловий комфорт. Для оцінки присутності мешканців використано стохастичну модель, що застосовує ймовірнісні та еволюційні алгоритми, а CO_2-датчики виступають основним джерелом даних. Нечітка логіка використовується для врахування невизначеності параметрів системи. Контрольні агенти застосовують Fuzzy Q-learning для роботи з безперервними змінними стану та керування. Моделювання підтвердило ефективність підходу, продемонструвавши точне оцінювання присутності мешканців та скорочення енергоспоживання до 56 % без суттєвого зниження рівня комфорту.

Метод DQL використовує штучні нейронні мережі замість традиційної Q-таблиці, що дає змогу працювати з більшими просторами станів та дій. У роботі [12] запропоновано систему на основі нейронної Q-learning моделі, яка здатна адаптивно вивчати закономірності споживання енергії в домогосподарствах, зменшуючи пікове навантаження та сприяючи енергозбереженню. В основі методу лежить Neural Fitted Q-learning, що забезпечує швидке й ефективне прийняття рішень щодо енергоспоживання, зберігаючи баланс між мінімізацією витрат та комфортом користувачів. Моделювання на основі класичного канадського будинку показало значне скорочення енергоспоживання в пікові періоди, що сприяє зниженню викидів та екологічному сталому розвитку. Автори наголошують, що масштабне впровадження такого підходу може суттєво знизити піковий попит і сприяти ефективнішому розподілу ресурсів.

Дослідження [13] присвячено оптимізації розкладу енергоспоживання в житлових будівлях за допомогою DRL. Використано алгоритми DQL та Deep Policy Gradient для управління електроспоживанням, зокрема, в умовах змінних тарифів на електроенергію. Аналіз датасету Pecan Street підтвердив ефективність запропонованого підходу, алгоритм Deep Policy Gradient доцільніший за DQL для задач реального часу, оскільки забезпечує мінімізацію витрат та згладжування навантаження.

Застосування RL у реальних будівлях супроводжується викликами, зокрема, тривалими фазами навчання та високими операційними витратами. У дослідженні [14] розглянуто використання Transfer Learning (TL) для адаптації RL-контролерів до нових середовищ. Запропоновано онлайн TL-метод, що поєднує імітаційне навчання та донавчання моделі для перенесення контролера між двома офісними будівлями. Попередньо натренований у цифровому двійнику контролер продемонстрував енергозбереження на рівні 6–40 % та покращення температурного контролю на 30–50 %.

Згідно аналізу наукових джерел більшість авторів використовували або менш результативне Q-learning, або складні методи, засновані на математичних моделях. У запропонованій роботі реалізовано прогресивний підхід до керування на основі навчання з підкріпленням, який базується на сучасному алгоритмі проксимальної оптимізації політики (*Proximal Policy Optimization*, PPO), що дає змогу підвищити енергоефективність будівлі, зберігаючи вимоги до комфорту мешканців. Отже, результати цього дослідження сприятимуть удосконаленню підходів до розроблення надійних енергоефективних систем керування.

Формулювання мети дослідження

Метою цього дослідження є розроблення удосконаленої стратегії керування HVAC системою будівлі на основі безмодельного алгоритму навчання з підкріпленням для підвищення енергоефективності порівняно з традиційними підходами.

Завдання дослідження: проаналізувати сучасні підходи до керування HVAC системами, розробити архітектуру для середовища ко-симуляції з навчанням з підкріпленням та реалізувати його інтеграцію з будівельною симуляцією EnergyPlus, реалізувати базову стратегію керування на основі традиційного методу коригування температури зовнішнього повітря, розробити контролер керування HVAC системою будівлі на основі глибокого навчання з підкріпленням, що ґрунтується на безмодельному алгоритмі PPO, порівняти ефективність базової стратегії з результатами, отриманими за допомогою запропонованого інтелектуального контролера.

Викладення основного матеріалу дослідження

Методологія

У цьому дослідженні застосувано сучасний безмодельний підхід із використанням навчання з підкріпленням [15]. RL – це тип машинного навчання, за якого агент (контролер) навчається знаходити найкращий спосіб розв'язання задачі шляхом експериментів [16]. Контролер навчається, отримуючи винагороду від своїх дій, позитивну або негативну, залежно від ефекту на середовище. Процес навчання агента полягає у визначенні найкращої дії для кожного можливого стану з метою максимізації загальної винагороди [17]. Метою агента є розроблення стратегії, яка забезпечує найвищу сумарну винагороду з часом. Це передбачає певний компроміс, агент має збалансувати дослідження нових, потенційно кращих стратегій із використанням уже набутих знань [18].

Проксимальна оптимізація політики

У цьому дослідженні використано алгоритм PPO, який є гнучким і поширеним методом RL для розв'язання задач керування. З 2018 року PPO є алгоритмом навчання з підкріпленням в OpenAI за замовчуванням. Його ключова перевага полягає в ефективному балансуванні між дослідженням нових стратегій та використанням наявних знань, що є критично важливим для оптимізації продуктивності в складних середовищах. PPO застосовують у різних галузях, зокрема, в управлінні енергетичними системами, оскільки він демонструє кращу відповідність гіперпараметрам і вищу ефективність тренування порівняно з алгоритмом DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient). Крім того, він забезпечує вигідніші значення цільової функції. Дослідження показали, що алгоритм PPO ефективно працює з неперервними просторами дій і має стабільніший механізм оновлення, що дає змогу знизити експлуатаційні витрати порівняно з DDPG. Зокрема, при застосуванні до задач енергетичного планування алгоритм PPO сприяв зменшенню енергетичних витрат порівняно з методами управління на основі MPC [19].

Алгоритм PPO підвищує стабільність навчання агента RL шляхом запобігання надмірним змінам політики. Він використовує коефіцієнт, що відображає розбіжність між поточною та попередньою політиками, та обмежує його в межах визначеного діапазону. Такий механізм "відсікання" гарантує, що оновлення політики залишаються помірними, що сприяє більшій стабільності в процесі навчання. Основна ідея PPO полягає у покращенні стабільності тренування шляхом обмеження величини змін політики на кожному етапі навчання, запобігаючи різким та потенційно негативним змінам. Це досягається за допомогою цільової функції, яка обмежує зміни політики у вузькому діапазоні. Такий підхід запобігає значним оновленням ваг, що могли б дестабілізувати процес навчання.

Марковський процес прийняття рішень

Задачу навчання з підкріпленням можна сформулювати як Марковський процес прийняття рішень (Markov Decision Process, MDP) [20, 21]. Для нашої задачі MDP можна визначити такими елементами:

- $\{S\}$ – множина можливих станів середовища (простір станів);
- $\{A\}$ – множина можливих дій агента (простір дій);
- $P_a(s_t, s_{t+1})$ – ймовірність переходу зі стану s_t у стан s_{t+1} після виконання дії a;
- $R_a(s_t, s_{t+1})$ – винагорода, отримана агентом після переходу зі стану s_t у стан s_{t+1} внаслідок виконання дії a.

На кожному кроці часу t агент, слідуючи певній політиці π, взаємодіє із середовищем, виконуючи дію a_t, визначену відповідно до стану s_t спостереження:

$$a_t = \pi(s_t).$$

Середовище реагує на цю дію, повертаючи винагороду R_{a_t}, і переходить до стану s_{t+1}. Метою агента є навчитися оптимальної політики π, яка максимізує сукупну винагороду протягом усієї послідовності взаємодій:

$$\max E\left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma_t R_{a_t}(s_t, s_{t+1})\right],$$

де γ – коефіцієнт дисконтування, що визначає вагу майбутніх винагород порівняно з попередніми ($0 \le \gamma \le 1$).

Простір станів

На кожному кроці часу агент отримує спостереження від середовища, які відображають поточний стан системи в цей момент часу, визначений так:

$$s_t = \{T_{out}, T_{in}, H_{in}, C_{in}, T_{htg_spt}, T_{clg_spt}, E_{htg_load}, E_{clg_load}\}. \quad (1)$$

Процес прийняття рішень глибоким агентом з підкріпленням враховує вісім різних змінних, виміряних в експериментальній будівлі під час симуляції з кроком часу t = 15 хвилин. Ці змінні разом з їхніми дозволеними діапазонами та одиницями вимірювання наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Змінні простору станів

Змінні	Мін.	Макс.	Одиниця	Опис
T_{out}	-40	40	°C	Температура зовнішнього повітря
T_{in}	0	40	°C	Температура повітря приміщення
H_{in}	0	100	%	Відносна вологість повітря приміщення
C_{in}	0	100 000	ppm	Концентрація CO_2 в повітрі
T_{htg_spt}	0	30	°C	Температура заданого значення термостата опалення
T_{clg_spt}	0	30	°C	Температура заданого значення термостата охолодження
E_{htg_load}	0	28	кВт·год	Навантаження на опалення (природний газ)
E_{clg_load}	0	28	кВт·год	Навантаження на охолодження (електроенергія)

Простір дій

Агент виконує на кожному кроці часу t (кожні 15 хвилин) дії, що представляють рішення щодо керування системою будівлі з використанням пристроїв для опалення та охолодження. У цьому дослідженні агент визначає оптимальну температуру подачі повітря як контрольну змінну, яка служить механізмами агента для оптимізації енергоефективності. Таким чином, дії на кроці часу t можуть бути представлені рівнянням:

$$a_t = \{T_{sat_t}\}. \quad (2)$$

Простір дій дискретний і складається з 100 можливих варіантів. У нашому дослідженні ці дискретні дії відображають неперервний діапазон від 15.0 до 30.0, що відповідає діапазону заданих температур подавання повітря.

Перехід між станами

Коли агент приймає рішення щодо керування, це впливає на стан середовища, що може призвести до нового стану. Перехід до конкретного нового стану залежить не лише від виконаної дії, але й від різних непередбачуваних факторів у середовищі. Моделювання цих переходів може бути дуже складним через невизначеності у середовищі [22]. Однак DRL пропонує спосіб уникнути цієї проблеми шляхом навчання безпосередньо з одержаного досвіду. Замість того, щоб намагатися явно моделювати ймовірність кожного переходу, DRL використовує нейронні мережі для визначення ефектів невизначеності на основі даних спостережень [23].

Функція винагороди

Основною функцією DRL контролера є оптимізація температури подавання повітря (T_{sat}) шляхом регулювання цієї змінної кожні 15 хвилин. Температура подавання повітря встановлюється в межах від 15 °C до 30 °C. Процес оптимізації має на меті зменшити дискомфорт температури в зоні, а також підтримувати вологість у межах прийнятних значень, мінімізуючи споживання енергії та рівень CO_2. Функція винагороди R_t, яка використовується для DRL агента, визначена так:

$$R_t = -(E_{penalty} + Temp_{penalty} + Hum_{penalty} + \mathrm{CO}_{2\,penalty}), \quad (3)$$

де:

$$R_{penalty} = -(E_{heating_load} + E_{cooling_load}),$$

$$Temp_{penalty} = \begin{cases} \min((T_{in} - T_{clg_spt}), (T_{htg_spt} - T_{in})), & \text{if } (T_{in} < T_{clg_spt} \text{ or } T_{in} > T_{htg_spt}) \\ 0 & \text{else} \end{cases},$$

$$Hum_{penalty} = \begin{cases} \min((H_{in} - 40), (60 - H_{in})), & \text{if } (H_{in} < 40 \text{ or } H_{in} > 60) \\ 0 & \text{else} \end{cases},$$

$$\mathrm{CO}_{2\,penalty} = C_{in}.$$

У такому формулюванні функції винагороди процес прийняття рішень у рамках MDP спрямований на визначення розкладів енергетичного управління, які максимізують комулятивну винагороду протягом часу, в результаті чого зменшуються експлуатаційні витрати [24].

Енергетичне споживання відображає загальне споживання енергії системою HVAC будівлі, що поєднує навантаження на опалення (природній газ) та охолодження (електрика). Дискомфорт температури в зоні мінімізується шляхом накладення штрафу (зменшення винагороди) на відхилення температури повітря в приміщенні T_{in} від встановленої

температури для опалення T_{htg_spt} та охолодження T_{clg_spt}. Коли температура в кімнаті опускається нижче температури опалення, штраф збільшується пропорційно тому, наскільки вона занадто низька. Однак, коли температура перевищує встановлену температуру для охолодження, штраф збільшується пропорційно, відображаючи дискомфорт від занадто високої температури, особливо в літні періоди, коли охолодження необхідне. Для оптимального рівня вологості накладається штраф, коли вологість H_{in} виходить за межі визначеного комфортного діапазону від 40 % до 60 %. Цей штраф збільшується відповідно до того, наскільки вологість відхиляється від дозволеного діапазону.

Розробка контролера з підкріпленням

У цьому підрозділі описано процес розроблення контролера з підкріпленням, який приймає керуючі рішення на основі попередньо навченої оптимальної політики та передає сигнали управління до змодельованої системи HVAC. Контролер реалізовано мовою програмування Python 3.11 з використанням фреймворку Gymnasium 0.28.1, що підтримується Farama Foundation і є форком OpenAI Gym [25]. Gymnasium спеціально розроблено для створення та тестування алгоритмів навчання з підкріпленням у конфігурованому просторі, де агенти взаємодіють з навколишнім середовищем за допомогою механізмів дій і винагород, навчаючись та коригуючи свою політику керування.

У межах дослідження розроблено кастомізоване середовище Gymnasium для симуляційної платформи EnergyPlus 24.2 – комплексного засобу енергетичного моделювання будівель, що дає змогу оцінювати споживання енергії з урахуванням потреб у опаленні, охолодженні та вентиляції.

Простори станів та дій сформовано відповідно до (1) та (2). Функцію винагороди визначено згідно з (3), що дає змогу кількісно оцінити ефективність дій агента для досягнення цільових показників – мінімізації енергоспоживання за умови збереження комфортних умов. Функція винагороди є ключовим елементом, що спрямовує процес навчання агента.

Схематична структура створеного середовища косимуляції представлена на рис. 1.

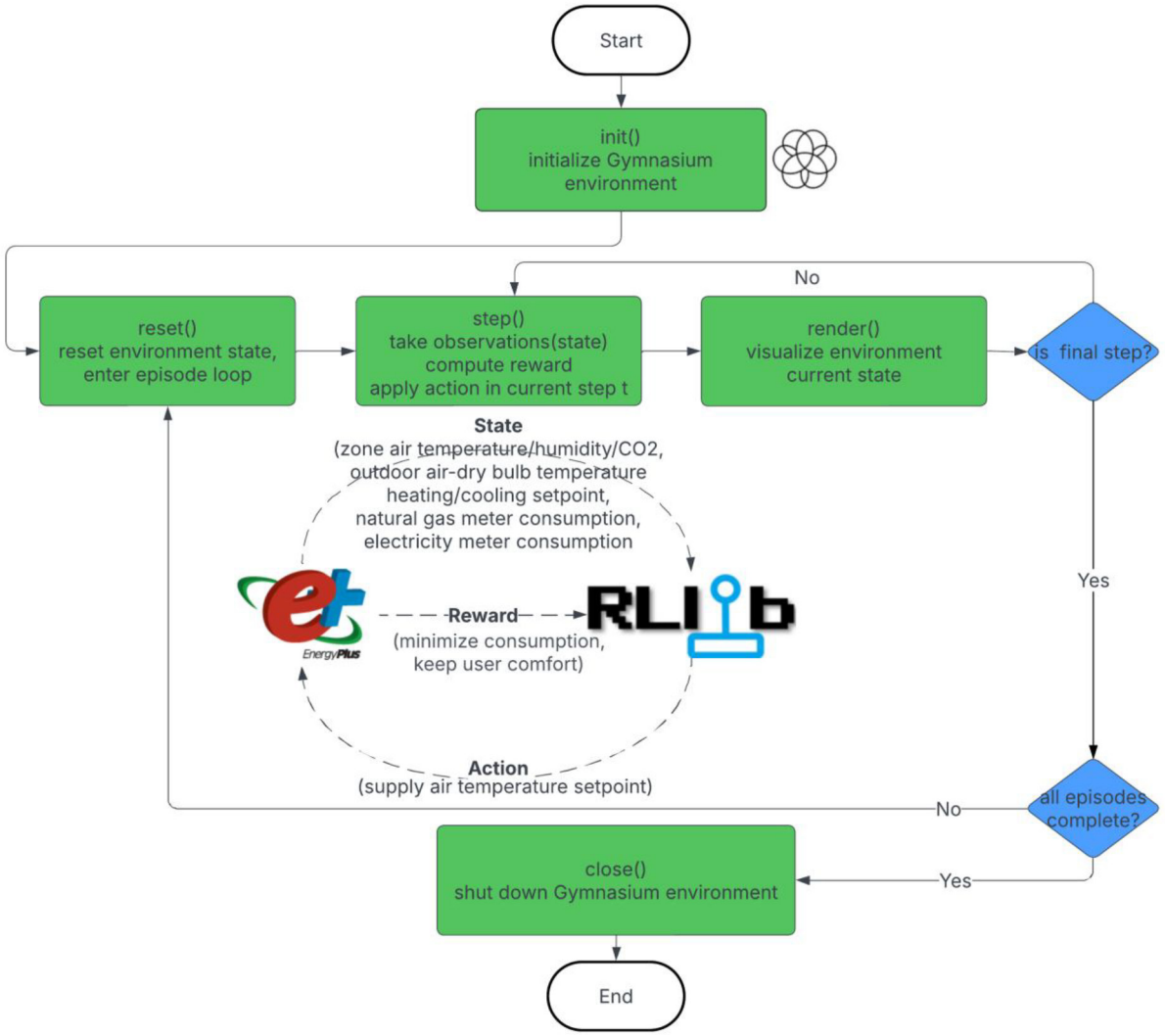


Рис. 1. Схема навчання з підкріпленням у поєднанні з симуляцією EnergyPlus

Для забезпечення програмного доступу до процесу симуляції в EnergyPlus ми використали EnergyPlus Python API, який надає інтеграційні можливості з фреймворком Gymnasium. Це дає змогу середовищу Gymnasium надсилати команди до симуляції EnergyPlus та отримувати зворотні дані. Така інтеграція формує двонаправлений канал зв'язку, де змінні стани симуляції постійно передаються до алгоритму навчання, а дії, запропоновані агентом, реалізуються в середовищі EnergyPlus.

Для налаштування алгоритму в межах цього спеціалізованого середовища використано бібліотеку Ray Reinforcement Learning Library (RLib) версії 2.20.2. Rlib – це високорівнева відкрита бібліотека, призначена для масштабованих, готових до впровадження алгоритмів навчання з підкріпленням, зокрема, алгоритму PPO та інших [26].

У ході дослідження застосовано такі гіперпараметри для налаштування алгоритму PPO: коефіцієнт дисконтування $\gamma = 0.95$, швидкість навчання $lr = 0.003$, оптимізатор – Adam, початковий коефіцієнт KL-дивергенції *kl_coeff* = 0.3, розмір навчального пакету *train_batch_size* = 2880, розмір мініпакету стохастичного градієнтного спуску *sgd_minibatch_size* = 360, коефіцієнт втрат функції цінності *vf_loss_coeff* = 0.01, параметр обрізання політики *clip_param* = 0.2, використання критика як базової функції *use_critic* = *true*, застосування генералізованого оцінювання переваги (GAE) *use_gae* = *true*. Також активовано шар довготривалої короткочасної пам'яті (LSTM) для покращення продуктивності в задачах із часовою залежністю. Для навчання використовувався фреймворк Torch.

Проведено низку циклів навчання та валідації з метою вдосконалення моделі. Ці цикли включали ітераційні запуски симуляцій, під час яких політика агента постійно адаптувалась на основі зворотного зв'язку з середовищем. Процес навчання тривав до досягнення певної кількості кроків *timesteps* = 2 880 000 (1000 епізодів), після чого зберігалася найкраща політика.

Розроблений додаток для косимуляції має консольний інтерфейс. Приклад роботи, вивід поточної ітерації, епізоду та значенням винагороди наведено на рис. 2. EnergyPlus дає опцію генерації вихідних файлів у форматі «csv», що містять результати симуляції. Зокрема, після завершення симуляції формується файл «eplusout.csv», який містить інформацію про значення змінних, встановлені параметри та лічильники на всіх кроках моделювання. Ці дані використано для побудови графіків та візуалізації процесу симуляції. Бібліотека Ray здійснює логування результатів у TensorBoard, що дає змогу аналізувати метрики навчання на всіх ітераціях.

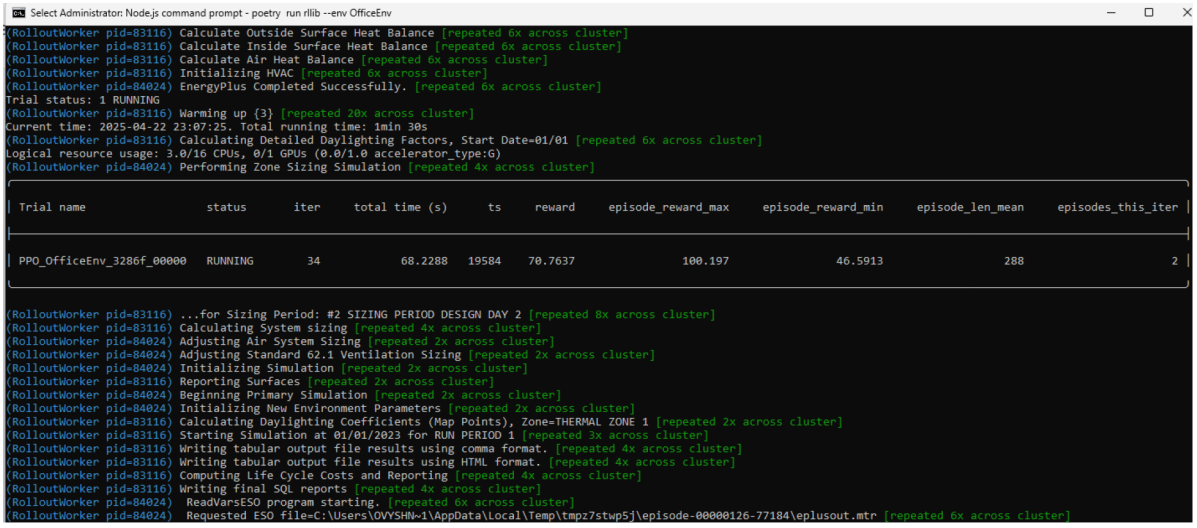


Рис. 2. Процес виконання розробленого додатку косимуляції

Експериментальні дослідження

Експерименти реалізовано на ноутбуці Asus Vivobook Pro, оснащеному 8-ядерним процесором AMD Ryzen 7 6800H з тактовою частотою 3.20 ГГц, 32 ГБ оперативної пам'яті та 12-ядерним графічним процесором AMD Radeon 680M під керуванням операційної системи Windows 11 Pro.

У цьому дослідженні використано середовище симуляції будівлі на основі моделювання в EnergyPlus версії 24.2.0. Для симуляцій застосовано модель середнього офісного будинку у форматі «idf» з прикладів OpenStudio Application версії 1.8.0, що продемонстровано на рис. 2. Дані про погодні умови для симуляції використано для львівського міжнародного аеропорту за 2009–2023 роки (файл «UKR_LV_Lviv.Intl.AP.333930_TMYx.2009-2023.epw») із репозиторію кліматичних даних для симуляцій будівель. Будівля має один поверх висотою 3 метри, чотири приміщення шириною і довжиною по 10 м, зовнішні стіни, зведені із цегли товщиною 100 мм, дах з легкого бетону товщиною 100 мм, два вікна і одні металеві двері (рис. 3).

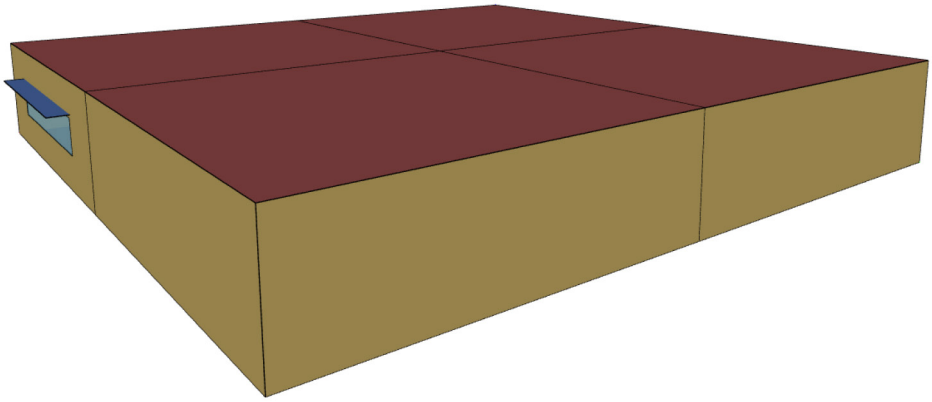


Рис. 3. Модель офісної будівлі, використана для симуляції

Модель будівлі оснащена системою HVAC з повітряним контуром, яка обслуговує теплову зону (рис. 4).

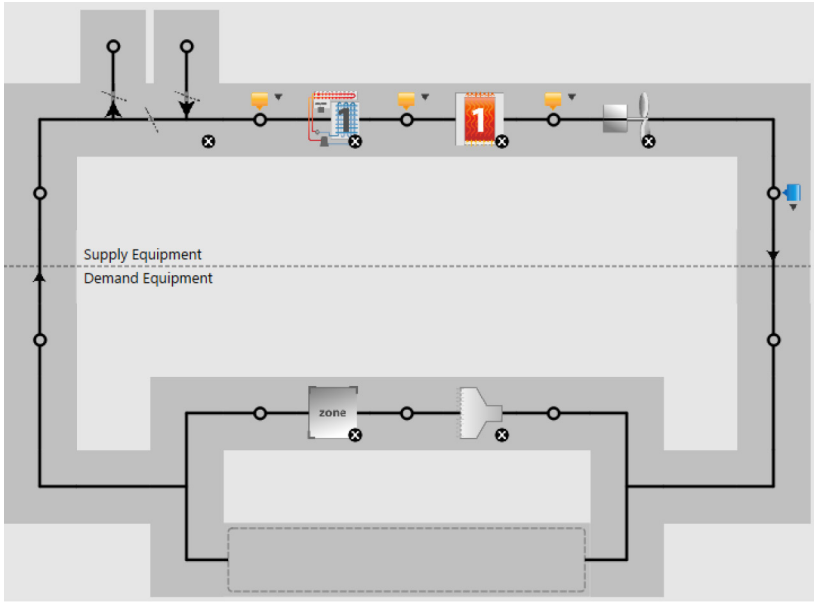


Рис. 4. Система HVAC з повітряним контуром

Система включає базовий охолоджувальний блок із прямим розширенням з одношвидкісним компресором. Нагрівання в повітряному контурі забезпечується газовим нагрівальним елементом. Рециркуляція повітря здійснюється за допомогою вентилятора. Система припливного повітря відповідає за подачу зовнішнього повітря та вентиляцію основного повітряного контуру. Вона забезпечує змішування свіжого зовнішнього повітря з повітрям, що повертається з приміщень, після чого змішане повітря піддається кондиціонуванню (охолодженню або нагріванню) перед повторною подачею в зони. Система працює з постійною витратою повітря без можливості регулювання подавання або повторного нагріву. Модель включає чотири приміщення з визначеними тепловими навантаженнями від людей, освітлення та електричного обладнання. Розклади для освітлення, кількості людей та електричних приладів, а також охолоджувальних і нагрівальних уставок змінюються залежно від часу доби, робочих днів та святкових періодів.

Симуляція в EnergyPlus охоплює один календарний місяць, з 1 по 30 квітня 2023 року. Для моделювання встановлено крок симуляції timestep = 4, що відповідає інтервалу 15 хвилин. Інші параметри моделі будівлі та налаштування симуляції наведено в табл. 2.

Проведено серію експериментів з налаштуванням гіперпараметрів агента глибокого навчання в рамках розробленого середовища косимуляції, починаючи з короткотривалого симуляційного періоду (1 день), 96 000 кроків часу та 1000 епізодів. Це дало змогу алгоритму PPO частіше оновлювати політику, що спрощує агенту навчання щоденних патернів, зменшує варіативність досвіду та забезпечує стабільніший навчальний сигнал завдяки налаштованій функції винагороди. Ми застосовували підхід поступового навчання, збільшуючи тривалість симуляції, коли ефективність агента покращується. Це пришвидшило цикл розробки та тестування, при цьому розширення

Таблиця 2

Параметри симуляції моделі будівлі

Параметр	Значення	Одиниця
Кількість людей	0,05	людей/m^2
Швидкість утворення вуглекислого газу	0,000038	L/s · W
Потужність освітлення приміщення	10	W/m^2
Потужність електричного обладнання	5	W/m^2
Потужність принтера	200	W
Задана температура на опалення (з 22:00 до 06:00)	15,6	°C
Задана температура на опалення (з 06:00 до 22:00)	21	°C
Задана температура на охолодження (з 22:00 до 06:00)	26,7	°C
Задана температура на охолодження (з 06:00 до 22:00)	24	°C
Алгоритм теплового балансу	Функція теплопередачі через огороджувальні конструкції	
Алгоритм теплового балансу повітря	Метод зворотної різниці третього порядку	
Алгоритм внутрішньої конвекції на поверхні	TARP	
Алгоритм зовнішньої конвекції на поверхні	DOE-2	
Кількість кроків симуляції на годину	4	

на триваліші симуляційні періоди потрібно для вдосконалення підходу, оскільки дає змогу захопити всі складнощі управління HVAC-системою.

Після цього етапу тренування ефективність навченого стратегії керування оцінено шляхом її впровадження та керування моделлю будівлі протягом місяця. Продуктивність контролера глибокого навчання оцінено шляхом аналізу сукупних накопичених винагород. Загалом результати продемонстрували здатність контролера одночасно ефективно оптимізувати кілька цілей, визначених у (3).

Після етапу тренування продуктивність контролера глибокого навчання порівняно з базовою стратегією керування температурою припливного повітря, реалізованою контролером «OutdoorAirReset» Setpoint Manager в EnergyPlus. Цей контролер забезпечує хороший баланс між стратегіями підігріву і охолодження на основі методу зменшення температури зовнішнього повітря. Контролер був налаштований на динамічну корекцію температури припливного повітря на основі зовнішніх умов: з налаштуванням температури подавання повітря 12,8 °C, коли зовнішня температура становить 15,6 °C або нижче, поступово збільшуючись до значення 18,3 °C, коли зовнішня температура досягає 26,7 °C або вище, забезпечуючи ефективне охолодження при збереженні комфорту в різних погодних умовах.

Результати політики керування температурою припливного повітря агентом RL і базової стратегії для першого тижня квітня представлені на рис. 5, де також наведено налаштування термостатів для опалення та охолодження, а також криву температури зовнішнього повітря для порівняння.

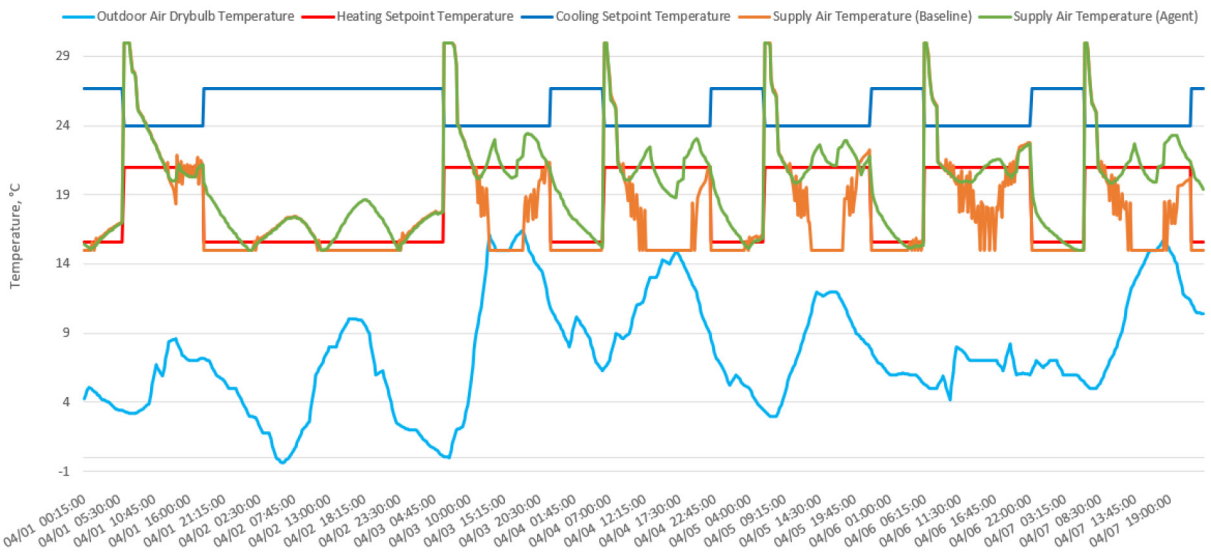


Рис. 5. Політика регулювання температури подавання повітря протягом одного тижня, порівняння між агентом з підкріпленням та базовим контролером

Зауважимо, що 1-го квітня, на початку робочого дня, обидва контролери намагаються підвищити температуру подавання повітря до комфортного для приміщення рівня. Протягом дня температура подавання повітря знижується у зв'язку зі зростанням температури зовнішнього повітря. 3-го квітня протягом робочих годин агент з навчанням з підкріпленням намагається підвищити температуру подавання повітря, щоб підтримувати температуру в приміщенні в межах установлених рівнів нагріву та охолодження. Натомість базовий контролер знижує температуру подавання повітря до мінімального значення, забезпечуючи її в приміщенні на нижній межі комфортного діапазону. Порівняння умов комфорту в приміщенні, включаючи температуру, вологість та концентрацію CO_2 у повітрі, продемонстровано на рис. 6.

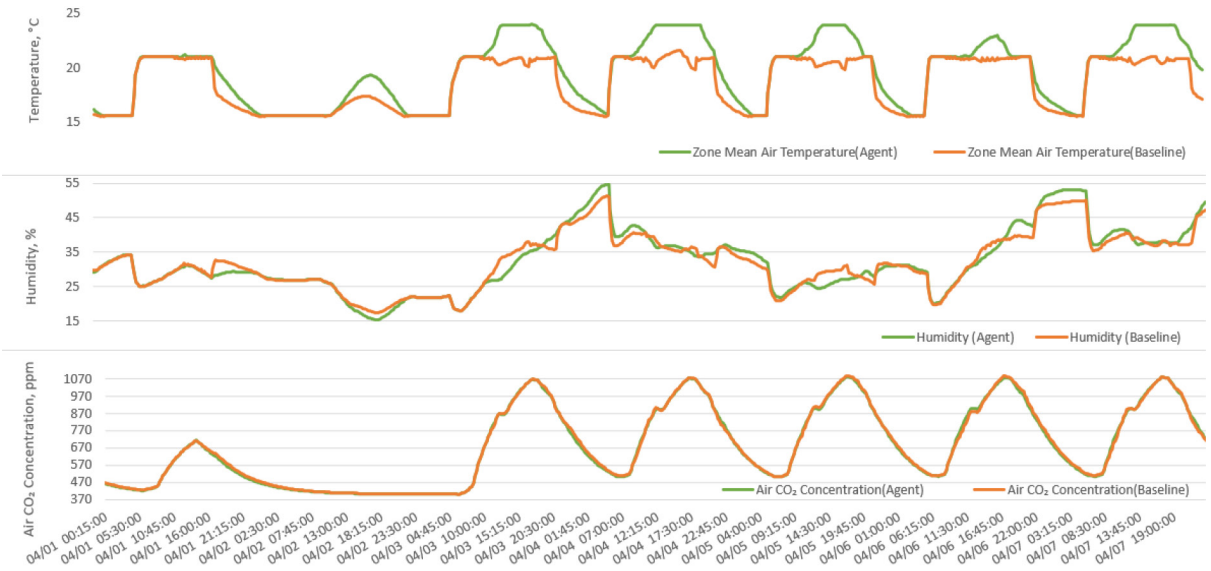


Рис. 6. Порівняння комфорту в приміщенні

Накопичене навантаження на опалення, сформоване агентом з навчанням з підкріпленням та традиційною системою керування на основі методу зменшення температури зовнішнього повітря, продемонстровано на рис. 7. Як видно, алгоритм навчання з підкріпленням демонструє більшу ефективність, забезпечуючи енергоспоживання 962,5 кВт·год енергії за місяць. Це становить скорочення енергоспоживання на 27,8 % порівняно зі стандартним контролером, який забезпечив енергоспоживання 1248,8 кВт·год за той самий період, при цьому зберігаючи належний рівень комфорту в приміщенні. Отримані результати підкреслюють потенціал інтелектуальних систем керування для оптимізації енергоспоживання будівель.

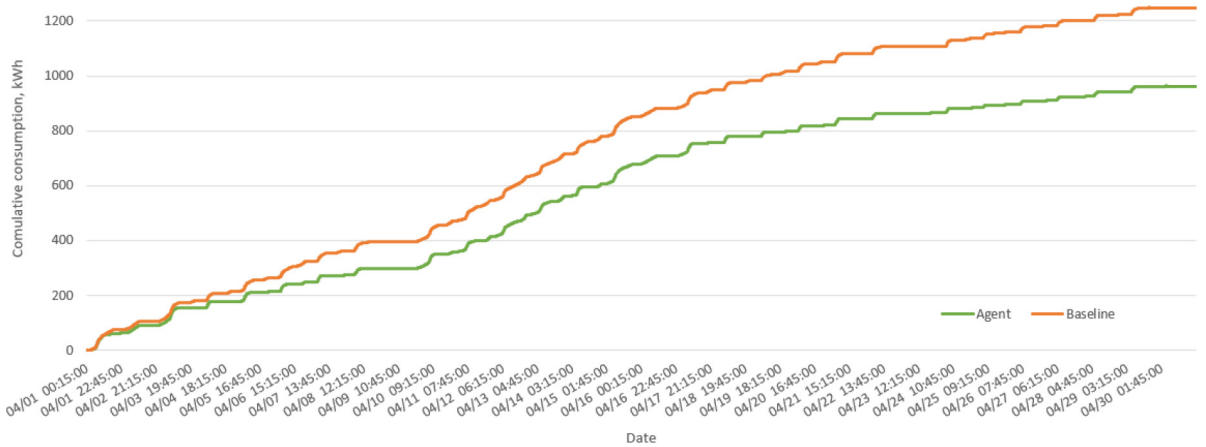


Рис. 7. Накопичене навантаження по опаленню агентом RL та базовим контролером

Висновки

У цьому дослідженні запропоновано інноваційний підхід до управління системою опалення, вентиляції та кондиціювання повітря у будівлях, що передбачає використання інтелектуального контролера з навчанням з підкріпленням, на основі безмодельного алгоритму Proximal Policy Optimization. Запропонований підхід інтегрує

симуляцію енергоспоживання офісної будівлі в EnergyPlus, що забезпечує точний і динамічний опис поведінки системи у різних задачах контролю, зокрема, в регулюванні температури подавання повітря до системи.

Розроблено середовище ко-симуляції Gymnasium для вдосконалення стратегії управління за допомогою алгоритмів навчання з підкріпленням. Ефективність створеного глибокого RL-контролера порівняно з традиційним контролером, який використовує метод коригування за допомогою зовнішньої температури повітря. Результати показали значне покращення енергоефективності, економія енергії склала 27,8 % при збереженні комфортних умов у приміщенні, включаючи температуру, вологість та рівень концентрації CO_2.

Методологія навчання з підкріпленням має потенціал зробити складні стратегії керування доступнішими для впровадження в реальні HVAC-системи. На відміну від традиційного керування на основі моделей, глибоке навчання з підкріпленням не потребує точного математичного представлення фізичної системи. Замість використання складних рівнянь рішення щодо управління приймаються безпосередньо на основі спостережень за зв'язком між виконаними діями та їхніми наслідками для стану системи.

Дослідження підкреслює перспективу поєднання штучного інтелекту та управління системою HVAC, сприяючи впровадженню розумних систем енергоменеджменту в реальних умовах.

Список використаної літератури

1. Walnum H. T., Sartori I., Ward P., Gros S. Demonstration of a low-cost solution for implementing MPC in commercial buildings with legacy equipment. Applied Energy. 2025, 380, 125012. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125012

2. Perera A. T. D., Kamalaruban P. Applications of reinforcement learning in energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021, 137, 110618. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110618

3. Cai W., Sawant S., Reinhardt D., Rastegarpour S., Gros S. A Learning-Based Model Predictive Control Strategy for Home Energy Management Systems. IEEE Access. 2023, vol. 11, pp. 145264–145280. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3346324

4. Bayer D., Pruckner M. Enhancing the Performance of Multi-Agent Reinforcement Learning for Controlling HVAC Systems. 2022 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech). 2022, pp. 187–194. https://doi.org/10.1109/SusTech53338.2022.9794179

5. Razzano G., Brandi S., Piscitelli M. S., Capozzoli A. Rule extraction from deep reinforcement learning controller and comparative analysis with ASHRAE control sequences for the optimal management of Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems in multizone buildings. Applied Energy. 2025, vol. 381, 125046. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125046

6. Heidari A., Maréchal F., Khovalyg D. An occupant-centric control framework for balancing comfort, energy use and hygiene in hot water systems: A model-free reinforcement learning approach. Applied Energy. 2022, vol. 312, 118833. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118833

7. Wen Z., O'Neill D., Maei H. Optimal Demand Response Using Device-Based Reinforcement Learning. IEEE Trans. Smart Grid. 2015, 6(5), 2312–2324. https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2396993

8. Huang X., Zhang D., Zhang X. Energy management of intelligent building based on deep reinforced learning. Alexandria Engineering Journal. 2021, 60(1), 1509–1517. https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.11.005

9. Mugumya K. L., Wong J. Y., Chan A., Yip C.-C., Ghazy S. Indoor haze particulate control using knowledge graphs within self-optimizing HVAC control systems. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020, 489(1), 012006. https://doi.org/10.1088/1755-1315/489/1/012006

10. Kim S., Lim H. Reinforcement Learning Based Energy Management Algorithm for Smart Energy Buildings. Energies. 2018, 11(8), 2010. https://doi.org/10.3390/en11082010

11. Korkidis P., Dounis A., Kofinas P. Computational Intelligence Technologies for Occupancy Estimation and Comfort Control in Buildings. Energies. 2021, 14(16), 4971. https://doi.org/10.3390/en14164971

12. Mahapatra C., Moharana A., Leung V. Energy Management in Smart Cities Based on Internet of Things: Peak Demand Reduction and Energy Savings. Sensors. 2017, 17(12), 2812. https://doi.org/10.3390/s17122812

13. Mocanu E., et al. On-Line Building Energy Optimization Using Deep Reinforcement Learning. IEEE Trans. Smart Grid. 2019, 10(4), pp. 3698–3708. https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2834219

14. Coraci D., et al. A scalable approach for real-world implementation of deep reinforcement learning controllers in buildings based on online transfer learning: The HiLo case study. Energy and Buildings. 2025, vol. 329, 115254. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115254

15. Spangher L., et al. Prospective Experiment for Reinforcement Learning on Demand Response in a Social Game Framework. Proceedings of the Eleventh ACM International Conference on Future Energy Systems. 2020, pp. 438–444. [In English]. https://doi.org/10.1145/3396851.3402365

16. Forootani A., Rastegar M., Jooshaki M. An Advanced Satisfaction-Based Home Energy Management System Using Deep Reinforcement Learning. IEEE Access. 2022, vol. 10, pp. 47896–47905. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3172327

17. Park B., Rempel A. R., Lai A. K. L., Chiaramonte J., Mishra S. Reinforcement Learning for Control of Passive Heating and Cooling in Buildings. IFAC-PapersOnLine. 2021, 54(20), pp. 907–912. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.11.287

18. Almughram O., Slama S. A. B., Zafar B. A. A Reinforcement Learning Approach for Integrating an Intelligent Home Energy Management System with a Vehicle-to-Home Unit. Applied Sciences. 2023, 13(9), 5539. https://doi.org/10.3390/app13095539

19. Wang J., Wang Y., Qiu D., Su H., Strbac G., Gao Z. Resilient energy management of a multi-energy building under low-temperature district heating: A deep reinforcement learning approach. Applied Energy. 2025, vol. 378, 124780. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124780

20. Tortorelli A., Sabina G., Marchetti B. A Cooperative Multi-Agent Q-Learning Control Framework for Real-Time Energy Management in Energy Communities. Energies. 2024, 17(20), 5199. https://doi.org/10.3390/en17205199

21. Vazquez-Canteli J., Kampf J., Nagy Z. Balancing comfort and energy consumption of a heat pump using batch reinforcement learning with fitted Q-iteration. Energy Procedia. 2017, vol. 122, pp. 415–420. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.429

22. Cordeiro-Costas M., Villanueva D., Eguía-Oller P., Granada-Alvarez E. Intelligent energy storage management trade-off system applied to Deep Learning predictions. Journal of Energy Storage. 2023, vol. 61, 106784. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106784

23. Du Y., Li F., Kurte K., Munk J., Zandi H. Demonstration of Intelligent HVAC Load Management with Deep Reinforcement Learning: Real-World Experience of Machine Learning in Demand Control. IEEE Power and Energy Mag. 2022, 20(3), pp. 42–53. https://doi.org/10.1109/MPE.2022.3150825

24. Liu C., Xue Z. Adaptive Optimization Design of Building Energy System for Smart Elderly Care Community Based on Deep Deterministic Policy Gradient. Processes. 2023, 11(7), 2155. https://doi.org/10.3390/pr11072155

25. Towers M., et al. Gymnasium: A Standard Interface for Reinforcement Learning Environments. ICLR 2025 Conference, 2025. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2407.17032

26. Liang E., et al. RLlib: Abstractions for Distributed Reinforcement Learning. Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning. 2018, vol. 80, pp. 3053–3062. https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.09381

References

1. Walnum, H. T., Sartori, I., Ward, P., & Gros, S. (2025). Demonstration of a low-cost solution for implementing MPC in commercial buildings with legacy equipment. *Applied Energy, 380*, 125012. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125012

2. Perera, A. T. D., & Kamalaruban, P. (2021). Applications of reinforcement learning in energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 137*, 110618. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110618

3. Cai, W., Sawant, S., Reinhardt, D., Rastegarpour, S., & Gros, S. (2023). A learning-based model predictive control strategy for home energy management systems. *IEEE Access, 11*, 145264–145280. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3346324

4. Bayer, D., & Pruckner, M. (2022). Enhancing the performance of multi-agent reinforcement learning for controlling HVAC systems. In *2022 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)* (pp. 187–194). IEEE. https://doi.org/10.1109/SusTech53338.2022.9794179

5. Razzano, G., Brandi, S., Piscitelli, M. S., & Capozzoli, A. (2025). Rule extraction from deep reinforcement learning controller and comparative analysis with ASHRAE control sequences for the optimal management of Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems in multizone buildings. *Applied Energy, 381*, 125046. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125046

6. Heidari, A., Maréchal, F., & Khovalyg, D. (2022). An occupant-centric control framework for balancing comfort, energy use and hygiene in hot water systems: A model-free reinforcement learning approach. *Applied Energy, 312*, 118833. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118833

7. Wen, Z., O'Neill, D., & Maei, H. (2015). Optimal demand response using device-based reinforcement learning. *IEEE Transactions on Smart Grid, 6*(5), 2312–2324. https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2396993

8. Huang, X., Zhang, D., & Zhang, X. (2021). Energy management of intelligent building based on deep reinforced learning. *Alexandria Engineering Journal, 60*(1), 1509–1517. https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.11.005

9. Mugumya, K. L., Wong, J. Y., Chan, A., Yip, C.-C., & Ghazy, S. (2020). Indoor haze particulate control using knowledge graphs within self-optimizing HVAC control systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 489*(1), 012006. https://doi.org/10.1088/1755-1315/489/1/012006

10. Kim, S., & Lim, H. (2018). Reinforcement learning based energy management algorithm for smart energy buildings. *Energies, 11*(8), 2010. https://doi.org/10.3390/en11082010

11. Korkidis, P., Dounis, A., & Kofinas, P. (2021). Computational intelligence technologies for occupancy estimation and comfort control in buildings. *Energies, 14*(16), 4971. https://doi.org/10.3390/en14164971

12. Mahapatra, C., Moharana, A., & Leung, V. (2017). Energy management in smart cities based on internet of things: Peak demand reduction and energy savings. *Sensors, 17*(12), 2812. https://doi.org/10.3390/s17122812

13. Mocanu, E., Mocanu, D. C., Nguyen, P. H., Liotta, A., Webber, M. E., Gibescu, M., & Slootweg, J. G. (2019). On-line building energy optimization using deep reinforcement learning. *IEEE Transactions on Smart Grid, 10*(4), 3698–3708. https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2834219

14. Coraci, D., Vishwanath, A., Bollinger, L. A., Goy, S., & Hoes, P. J. (2025). A scalable approach for real-world implementation of deep reinforcement learning controllers in buildings based on online transfer learning: The HiLo case study. *Energy and Buildings, 329*, 115254. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115254

15. Spangher, L., Gorczyca, M., Luca, M. D., Masood, F. M., Aggarwal, G., Melman, A., Yang, I., & Bayen, A. M. (2020). Prospective experiment for reinforcement learning on demand response in a social game framework. In *Proceedings of the Eleventh ACM International Conference on Future Energy Systems* (pp. 438–444). ACM. https://doi.org/10.1145/3396851.3402365

16. Forootani, A., Rastegar, M., & Jooshaki, M. (2022). An advanced satisfaction-based home energy management system using deep reinforcement learning. *IEEE Access, 10*, 47896–47905. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3172327

17. Park, B., Rempel, A. R., Lai, A. K. L., Chiaramonte, J., & Mishra, S. (2021). Reinforcement learning for control of passive heating and cooling in buildings. *IFAC-PapersOnLine, 54*(20), 907–912. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.11.287

18. Almughram, O., Slama, S. A. B., & Zafar, B. A. (2023). A reinforcement learning approach for integrating an intelligent home energy management system with a vehicle-to-home unit. *Applied Sciences, 13*(9), 5539. https://doi.org/10.3390/app13095539

19. Wang, J., Wang, Y., Qiu, D., Su, H., Strbac, G., & Gao, Z. (2025). Resilient energy management of a multi-energy building under low-temperature district heating: A deep reinforcement learning approach. *Applied Energy, 378*, 124780. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124780

20. Tortorelli, A., Sabina, G., & Marchetti, B. (2024). A cooperative multi-agent Q-learning control framework for real-time energy management in energy communities. *Energies, 17*(20), 5199. https://doi.org/10.3390/en17205199

21. Vazquez-Canteli, J., Kampf, J., & Nagy, Z. (2017). Balancing comfort and energy consumption of a heat pump using batch reinforcement learning with fitted Q-iteration. *Energy Procedia, 122*, 415–420. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.429

22. Cordeiro-Costas, M., Villanueva, D., Eguia-Oller, P., & Granada-Alvarez, E. (2023). Intelligent energy storage management trade-off system applied to deep learning predictions. *Journal of Energy Storage, 61*, 106784. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106784

23. Du, Y., Li, F., Kurte, K., Munk, J., & Zandi, H. (2022). Demonstration of intelligent HVAC load management with deep reinforcement learning: Real-world experience of machine learning in demand control. *IEEE Power and Energy Magazine, 20*(3), 42–53. https://doi.org/10.1109/MPE.2022.3150825

24. Liu, C., & Xue, Z. (2023). Adaptive optimization design of building energy system for smart elderly care community based on deep deterministic policy gradient. *Processes, 11*(7), 2155. https://doi.org/10.3390/pr11072155

25. Towers, M., Albrecht, S. V., Bohmer, W., Brockman, G., Cheney, N., Chen, L., Firoiu, V., Greydanus, S., Huang, S., Kappler, D., Klimov, O., Lillicrap, T., Marino, J., Morad, S., Osband, I., Perez, C. F., Racanière, S., & Todorov, E. (2025). Gymnasium: A standard interface for reinforcement learning environments. In *ICLR 2025 Conference*. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2407.17032

26. Liang, E., Liaw, R., Nishihara, R., Moritz, P., Fox, R., Goldberg, K., Gonzalez, J., Jordan, M., & Stoica, I. (2018). RLlib: Abstractions for distributed reinforcement learning. In *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning* (Vol. 80, pp. 3053–3062). https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.09381

УДК 004.8 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.12

Р. В. ВІТ
аспірант кафедри комп'ютерних наук
Хмельницький національний університет
ORCID: 0009-0009-6958-4730

О. В. МАЗУРЕЦЬ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерних наук
Хмельницький національний університет
ORCID: 0000-0002-8900-0650

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ПСИХОЛОГІЧНОГО ЦИФРОВОГО ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ ЗА АНАЛІЗОМ ТЕКСТОВИХ ДАНИХ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИМИ МОДЕЛЯМИ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ

У роботі представлено метод виявлення психологічного цифрового перевантаження, що ґрунтується на застосуванні нейромережевих моделей глибокого навчання, зокрема архітектури BERT, адаптованої для бінарної класифікації текстового контенту. Дослідження спрямоване на вирішення науково-прикладної задачі автоматизованого аналізу психоемоційного стану користувачів у цифровому середовищі, що виникає під впливом тривалої взаємодії з цифровими технологіями. Актуальність запропонованого підходу обумовлюється зростаючою потребою в об'єктивних, масштабованих та інтерпретованих засобах ідентифікації когнітивного перевантаження, які здатні функціонувати без залучення експертного втручання.

Метод реалізовано як семистадійну процедуру, яка охоплює попередню обробку текстів, нейромережеву класифікацію, тематичне моделювання, виокремлення цільових об'єктів предметної області та формування багаторівневої оцінки психологічного цифрового перевантаження з подальшою візуалізацією результатів. Основу обчислювального ядра становить модель BERT, яка формує контекстуалізовані представлення текстових послідовностей і забезпечує високу точність виявлення латентних станів користувачів на основі аналізу їх цифрового мовлення. Семантична деталізація реалізується шляхом інтеграції тематичної класифікації з методами виявлення ключових понять на основі NER, TF-IDF та дисперсного аналізу, що дозволяє визначати інформаційні осередки когнітивного навантаження в межах текстових профілів.

Модель протестовано на відкритих корпусах соціальних повідомлень, де за основними метриками досягнуто значень Accuracy 0.83, Precision 0.87, Recall 0.88 та F1-score 0.87. Отримані результати демонструють придатність нейромережевого підходу для розв'язання задачі класифікації психологічного цифрового перевантаження як стану, що виявляється через мовні індикатори. Метод дозволяє не лише здійснювати інтегральну оцінку рівня психологічного цифрового перевантаження, а й локалізувати її прояви у тематичних сегментах тексту, що формує підґрунтя для інтерпретації класифікаційного рішення та прийняття управлінських рішень у сфері цифрової взаємодії.

Результати дослідження можуть бути застосовані для розробки інформаційних систем підтримки ментального добробуту, адаптації цифрових сервісів до індивідуального навантаження користувача та моніторингу психологічних ризиків у комунікаційно насичених середовищах. Запропонований підхід розширює інструментарій аналізу природної мови в контексті психоемоційної діагностики та сприяє формуванню науково обґрунтованої основи для впровадження методів штучного інтелекту в галузі цифрової гігієни.

Ключові слова: *цифрове перевантаження, нейромережі.*

R. V. VIT
Postgraduate Student at the Computer Science Department
Khmelnytskyi National University
ORCID: 0009-0009-6958-4730

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

METHOD FOR DETECTING PSYCHOLOGICAL DIGITAL OVERLOAD BY ANALYZING TEXT DATA WITH DEEP LEARNING NEURAL NETWORK MODELS

The paper presents a method for detecting psychological digital overload, based on the use of deep learning neural network models, in particular the BERT architecture adapted for binary classification of text content. The research is aimed at solving the scientific and applied problem of automated analysis of the psycho-emotional state of users in the digital environment, which arises under the influence of prolonged interaction with digital technologies. The relevance of the proposed approach is due to the growing need for objective, scalable and interpretable means of identifying cognitive overload, which are able to function without expert intervention. The method is implemented as a seven-stage procedure that includes text preprocessing, neural network classification, thematic modeling, isolation of target objects of the subject area and the formation of a multi-level assessment of psychological digital overload with subsequent visualization of the results. The basis of the computational core is the BERT model, which forms contextualized representations of text sequences and provides high accuracy in detecting latent states of users based on the analysis of their digital speech. Semantic detailing is implemented by integrating thematic classification with key concept detection methods based on NER, TF-IDF and variance analysis, which allows determining information centers of cognitive load within text profiles. The model was tested on open corpora of social messages, where the values of Accuracy 0.83, Precision 0.87, Recall 0.88 and F1-score 0.87 were achieved for the main metrics. The obtained results demonstrate the suitability of the neural network approach for solving the problem of classifying psychological digital overload as a state manifested through language indicators. The method allows not only to carry out an integral assessment of the level of psychological digital overload, but also to localize its manifestations in thematic segments of the text, which forms the basis for interpreting the classification decision and making management decisions in the field of digital interaction.

The results of the study can be applied to the development of information systems to support mental well-being, adapting digital services to the individual user load and monitoring psychological risks in communication-saturated environments. The proposed approach expands the tools of natural language analysis in the context of psycho-emotional diagnostics and contributes to the formation of a scientifically sound basis for the implementation of artificial intelligence methods in the field of digital hygiene.

Key words: *digital overload, neural networks.*

Постановка проблеми

З одного боку, цифрова втома визнається реальним психологічним станом, що виникає внаслідок тривалої взаємодії з цифровими пристроями, і вимагає своєчасного виявлення для запобігання негативним наслідкам для здоров'я [1]. З іншого боку, існуючі підходи до її діагностики ґрунтуються переважно на самооцінюванні або експертних методах, які не дозволяють здійснювати об'єктивний, масштабований і автоматизований моніторинг [2]. Це створює протиріччя між потребою у точних, автономних засобах виявлення психологічного цифрового перевантаження та відсутністю ефективних інструментів, здатних забезпечити діагностику в реальному часі.

В умовах зростання цифрового навантаження виникає потреба у розробці методів, що дозволяють автоматизовано виявляти ознаки психологічного цифрового перевантаження на основі об'єктивних даних про поведінку користувачів [3, 4]. Проблема полягає в тому, що на сьогодні не існує достатньо досліджених та апробованих нейромережевих моделей глибокого навчання, здатних з високою точністю ідентифікувати цифрове перевантаження, з урахуванням багатовимірності відповідних ознак і складності їх інтерпретації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Автоматизоване виявлення психологічного цифрового перевантаження є новітнім міждисциплінарним напрямом, що поєднує методи обробки природної мови, психології, комп'ютерних наук та поведінкової аналітики. З огляду на збільшення навантаження на психоемоційний стан користувачів у цифровому середовищі [5], особливо в умовах гібридного навчання, дистанційної роботи та перенасичення інформацією, виникає потреба у створенні систем, здатних своєчасно виявляти ознаки ментального виснаження [6]. Такий підхід передбачає інтеграцію алгоритмів машинного навчання для аналізу текстових, поведінкових та фізіологічних даних з метою визначення рівня втоми, стресу або вигорання.

Зокрема, у статті [7] здійснено дослідження застосування методів обробки природної мови та машинного навчання для виявлення індикаторів професійного вигорання на основі текстового контенту. Для аналізу сформовано корпус із 13 568 анонімізованих текстових повідомлень, отриманих із соціальної платформи Reddit, серед яких 352 повідомлення ідентифіковано як пов'язані з вигоранням та 979 – з депресією. Запропоновано та реалізовано ансамблеві підходи до класифікації, що базуються на стратегіях поділу даних за ознакою субреддиту та випадковим батчингом. Отримані результати демонструють, що ансамблеві моделі суттєво перевищують базові класифікатори за показниками збалансованої Accuracy (0.93), тестового F1-score (0.43) та тестової Recall (0.93). Проведене дослідження підтверджує ефективність використання NLP-методів для раннього виявлення симптомів професійного вигорання за текстовими даними, що відкриває перспективи для подальшого розвитку автоматизованих систем моніторингу психоемоційного стану.

У роботі [8] досліджено можливість прогнозування рівня стомлення користувачів за допомогою пасивного збору даних про їхню взаємодію зі смартфоном. Автори порівняли низку алгоритмів машинного навчання – від опорних векторних машин до ансамблевих методів і дерев рішень – та застосували різні стратегії відбору ознак. Найвища точність була досягнута з використанням методу випадкового лісу в поєднанні з ANOVA-відбором ознак, що свідчить про значущий внесок таких показників, як тривалість роботи з додатками, інтенсивність сповіщень та рівень енергоспоживання пристрою [9]. У перспективі пропонується розширити демографічний портрет учасників, інтегрувати дані з носимих сенсорів для відображення фізіологічних параметрів і дослідити додаткові моделі взаємодії зі смартфоном [10]. Поєднання цифрових і біометричних даних може забезпечити глибше розуміння причин стомлення та стати підґрунтям для персоналізованих втручань у сфері громадського здоров'я та підвищення продуктивності.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розроблення методу виявлення психологічного цифрового перевантаження на основі нейромережевих моделей глибокого навчання, який забезпечує автоматизовану ідентифікацію стану психологічного цифрового перевантаження користувачів за даними їхньої поведінки у цифровому середовищі.

Викладення основного матеріалу дослідження

Метод виявлення психологічного цифрового перевантаження та вигорання в текстовому контенті автора реалізовано як послідовність із семи взаємопов'язаних етапів. На початку формується вхідний набір даних, який складається із профілю автора – тобто всіх доступних текстів, що він створив та які підлягають аналізу – і тренованої нейромережі, призначеної для розпізнавання ознак когнітивного і емоційного перевантаження.

Схема та кроки методу виявлення психологічного цифрового перевантаження та вигорання наведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема та кроки методу виявлення психологічного цифрового перевантаження

Першим кроком здійснюється попередня обробка текстів: кожне повідомлення очищується від непотрібних символів і службових слів [11], токенізується і лематизується [12], а також виділяються іменовані сутності [13, 14]. Цей підхід гарантує, що надалі аналіз буде спиратися на стандартизований лінгвістичний матеріал без шумових елементів [15].

На другому кроці підготовлені тексти подаються на вхід нейромережі (BERT), яка в результаті видає для кожного повідомлення ймовірнісні оцінки рівня психологічного цифрового перевантаження та вигорання. Цей проміжний прогноз служить первинним маркером навантаження і лягає в основу подальшого семантичного аналізу [16]. Вибір моделі BERTForSequenceClassification зумовлений її здатністю формувати контекстуалізовані векторні

уявлення текстових послідовностей, що забезпечує високу якість класифікації навіть за обмеженої довжини вхідних даних. Завдяки попередньому тренуванню на великому корпусі текстів, архітектура BERT ефективно враховує семантичні та синтаксичні зв'язки між токенами, що є критично важливим для виявлення складних когнітивних та емоційних станів, таких як цифрова втома. Інтеграція класифікаційної «голови» дозволяє адаптувати модель до специфічного завдання бінарної класифікації [17], а механізм маскування уваги й обмеження довжини послідовності підвищують обчислювальну ефективність без суттєвих втрат інформативності [18].

Третій крок передбачає тематичну класифікацію текстів у профілі автора за допомогою тематичного моделювання (алгоритм LDA) [19]. Кожному повідомленню призначається домінуюча тематика, що дозволяє виділити сегменти спілкування – логічні кластери текстів із однорідною змістовною спрямованістю.

Після формування сегментів на четвертому етапі застосовують метод виявлення цільових об'єктів предметної області. Для кожної теми із застосуванням комбінованих алгоритмів (NER, TF-IDF, YAKE! Та дисперсної оцінки) визначається множина ключових понять, яка уточнює тематичну специфіку й слугує точковим індикатором релевантності.

П'ятий крок полягає у збагаченні словникового ядра, отриманого в ході тематичної класифікації, цільовими об'єктами з попереднього розділу. Це дозволяє підвищити точність і повноту відбору ключових слів, що відображають семантичні особливості кожного тематичного сегмента.

На шостому кроці поєднують прогнози нейромережі з тематично-семантичними індикаторами задля обчислення загального рівня психологічного цифрового перевантаження автора. Використовуючи зважену агрегацію окремих сигналів, система формує суцільну оцінку загального навантаження, що відображає ступінь вигорання всієї сукупності текстів.

Нарешті, сьомий крок деталізує цю оцінку на рівні окремих сегментів спілкування: для кожної теми розраховується локальний показник психологічного цифрового перевантаження та вигорання з урахуванням домінантних об'єктів і стилістичних особливостей текстів. У підсумку метод видає багаторівневу «карту» втоми, яка поєднує загальну та тематичну візуалізацію рівня когнітивного й емоційного навантаження автора. Така архітектура гарантує як глибоку деталізацію, так і інтуїтивно зрозуміле представлення результатів, що сприяє своєчасному виявленню ознак цифрового перевантаження та розробці превентивних заходів.

Для дослідження методу виявлення психологічного цифрового перевантаження було створено програмне забезпечення у хмарному сервісі GoogleColab. Програмне забезпечення має модуль навчання нейромереж та модуль виявлення психологічного цифрового перевантаження.

Наборами даних дослідження визначено «Healthcare Workers' Burnout Tweets» [20], що використано для навчання нейромережевої моделі BERT методу виявлення психологічного цифрового перевантаження нейромережевими моделями глибокого навчання та «Mental Health Social Media» [21], що використано для валідації методу виявлення психологічного цифрового перевантаження нейромережевими моделями глибокого навчання.

При навчанні нейромережевої архітектури BERT були отримані такі результати за метриками: Accuracy 0.83, Precision 0.87, Recall 0.88, F1 0.87, при цьому матриця плутанини наведена на рис. 2.

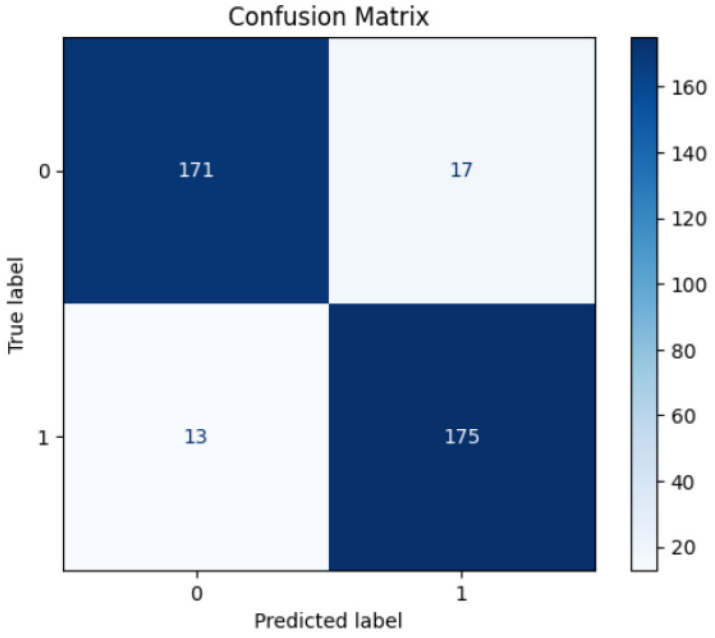


Рис. 2. Матриця плутанини нейромережі BERT

Датасет для валідації методу обрано [22], оскільки кожен пост має ідентифікатор користувача, за яким будується цифровий профіль автора. Відповідно, для обраного користувача датасету було виконано аналіз рівня психологічного цифрового перевантаження.

Для визначених категорій отримано цифрову мапу щодо рівня вигорання та психологічного цифрового перевантаження, наведену на рис. 3.



Рис. 3. Мапа виявлення вигорання та психологічного цифрового перевантаження

Перша тема містить слова, які ймовірно пов'язані з проблемами, які можуть бути пов'язані з цифровою втомою або вигоранням, такими як: «therapy», «treatment», «disorders», «depressive», «work», «boss». Ці слова свідчать про стрес, тривогу, втому, а також про взаємодію з робочими обов'язками, що є важливими аспектами для теми, яка описує цифрову втому. Наприклад, слова «therapy» та «treatment» можуть вказувати на пошук рішень або підтримки у боротьбі з цією проблемою, а «depressive» і «disorders» пов'язують проблему з психологічними аспектами.

У той же час слова на кшталт «work» та «boss» вказують на потенційні стресори на робочому місці, що є значущими в контексті психологічного цифрового перевантаження, оскільки люди, що працюють в умовах постійної цифрової взаємодії, часто відчувають перевантаження через високі вимоги, зокрема від начальства.

Друга тема більш загальна, і включає слова, які в основному стосуються життя, домашніх справ і взаємодії в сім'ї: «talk», «business», «article», «help», «life», «family», «wife», «home». Це може бути менш специфічним до цифрового перевантаження, оскільки ці слова більше належать до соціальних аспектів життя. Проте частина з них, зокрема «help», «business» або «life», може бути інтерпретована як зв'язок із стресом або труднощами, які можуть виникати через перенавантаження в роботі чи особистому житті, що також може призводити до емоційного виснаження.

Для першої теми високий відсоток вигорання (78 %) виглядає логічним, оскільки слова з цієї теми справді більше пов'язані із стресовими ситуаціями, які можуть спричиняти цифрову втому: робота, депресія, терапія тощо. Висока частота таких слів вказує на те, що це тема, яка охоплює більшість факторів, що можуть призвести до вигорання.

Друга тема, з відсотком вигорання 24 %, містить слова, що більше стосуються соціальних аспектів життя, які можуть бути менш тісно пов'язані з цифровою втомою або стресом, спричиненим надмірним використанням технологій. Наприклад, слова «family», «home», «wife» мають менший зв'язок з цифровою втомою, що виправдовує нижчий відсоток.

Висновки

Метод виявлення психологічного цифрового перевантаження, заснований на нейромережевих моделях глибокого навчання, репрезентує підхід до діагностики психоемоційного стану користувачів через аналіз текстового контенту. У межах розробленої методики здійснюється послідовна обробка текстів, що включає очищення, лематизацію, токенізацію та виділення іменованих сутностей. Ці підготовлені дані подаються на вхід нейромережі, що дозволяє не лише класифікувати повідомлення за рівнем психологічного цифрового перевантаження, а й здійснити семантичний аналіз для виявлення тематичних осередків когнітивного та емоційного перевантаження.

Особливістю даного методу є його здатність до візуальної інтерпретації результатів, що створює додаткову аналітичну цінність для кінцевих користувачів. Використання архітектури BERT забезпечило високу точність

класифікації та збалансованість в розпізнаванні обох класів – наявності та відсутності психологічного цифрового перевантаження, досягнувши значень метрик на валідаційних даних Accuracy 0.83, Precision 0.87, Recall 0.88 та F1 0.87. Модель продемонструвала ефективність у правильній ідентифікації більшості випадків, хоча залишаються деякі труднощі з розпізнаванням менш очевидних проявів втоми, що вказує на перспективи подальшого вдосконалення.

Загалом, запропонований метод підтвердив свою життєздатність як інструмент для автоматизованого моніторингу психоемоційного стану на основі текстового аналізу. Його застосування сприяє підвищенню якості діагностики психологічного цифрового перевантаження, відкриває можливості для інтеграції в системи адаптації цифрових сервісів до ментального стану користувачів і створює підґрунтя для подальших досліджень у сфері персоналізованих інтерфейсів і цифрової гігієни.

Список використаної літератури

1. Watkins J. Alleviating digital fatigue through embodied artistic practice and green space. International Journal of Performance Arts and Digital Media. 2024. P. 1–16. URL: https://doi.org/10.1080/14794713.2024.2305448 (date of access: 27.05.2025).

2. Fatigue-Related Changes of Daily Function: Most Promising Measures for the Digital Age / W. Maetzler et al. Digital Biomarkers. 2024. P. 30–39. URL: https://doi.org/10.1159/000536568 (date of access: 27.05.2025).

3. Конфігурування нейронної мережі для класифікації емоційної тональності текстової інформації за показниками семантичної зв'язності / О. О. Залуцька та ін. Збірник наукових праць за матеріалами XV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2023». Хмельницький, 2023. С. 102–107.

4. Byrne M. Special Topic on Reducing Technology Related Stress and Burnout: Digital Compassion Fatigue as an Emerging Phenomenon for Registered Nurses Experiencing Techno-stress. Applied Clinical Informatics. 2025. URL: https://doi.org/10.1055/a-2564-8809 (date of access: 27.05.2025).

5. Алгоритм виявлення аб'юзивного вмісту в україномовному аудіоконтенті для імплементації в об'єктно-орієнтовану інформаційну систему / М. О. Молчанова та ін. Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету» серія: Технічні науки. 2024. № 1 (331). С. 101–106. URL: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-17 (date of access: 27.05.2025).

6. Machine learning assisted human fatigue detection, monitoring, and recovery: Review / A. Lambay et al. Digital Engineering. 2024. P. 100004. URL: https://doi.org/10.1016/j.dte.2024.100004 (date of access: 27.05.2025).

7. BurnoutEnsemble: Augmented Intelligence to Detect Indications for Burnout in Clinical Psychology / G. Merhbene et al. Frontiers in Big Data. 2022. Vol. 5. URL: https://doi.org/10.3389/fdata.2022.863100 (date of access: 27.05.2025)

8. Yang, Y. Predict fatigue using smartphone usage data: Doctoral dissertation in Information Technologies / Y. Yang. – Tilburg: Tilburg University, 2024. – 150 p.

9. Expressions of pandemic fatigue on digital platforms: a thematic analysis of sentiment and narratives for infodemic insights / B. K. White et al. BMC Public Health. 2024. Vol. 24, no. 1. URL: https://doi.org/10.1186/s12889-024-17718-4 (date of access: 27.05.2025).

10. Imran M. A. A., Nasirzadeh F., Karmakar C. Designing a practical fatigue detection system: A review on recent developments and challenges. Journal of Safety Research. 2024. Vol. 90. P. 100–114. URL: https://doi.org/10.1016/j.jsr.2024.05.015 (date of access: 27.05.2025).

11. Метод виявлення цільових об'єктів предметної області у текстовому контенті / О. В. Мазурець, Р. В. Віт. Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету» серія: Технічні науки. 2024. № 6, Т. 1(343). С. 152–157. URL: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-23 (date of access: 27.05.2025).

12. Інтелектуальний метод виявлення цільових об'єктів предметної області за показниками семантичної зв'язності для класифікації текстової інформації / О. В. Мазурець, Р. В. Віт. Розвитки інформаційно-керуючих систем та технологій: монографія. Львів-Торунь : Lina-Pres, 2024. С. 223–244.

13. Інтелектуальний метод виявлення цільових об'єктів предметної області для класифікації текстової інформації / О. Мазурець, Р. Віт. Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи та технології ІУСТ-ОДЕСА-2024». Одеса, 23–25 вересня 2024 р. 2024. С. 205–208.

14. Метод виявлення множин цільових об'єктів предметної області у текстовому контенті / Р. В. Віт, О. В. Мазурець. Збірник наукових праць за матеріалами XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024». Хмельницький, 15–16 листопада 2024 р. 2024. С. 78–82.

15. Дослідження ефективності методу виявлення цільових об'єктів предметної області / О. В. Мазурець, Р. В. Віт. Інформаційні технології і автоматизація: матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції. Одеса, ОНТУ, 31 жовтня – 1 листопада 2024 р. 2024. С. 650–653.

16. Експертна система нейромережевого визначення рівня епідеміологічної небезпеки за часовими показниками / О. М. Овчарук та ін. Збірник наукових праць за матеріалами XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2022». Хмельницький, 2022. С. 217–222.

17. Виявлення цільових об'єктів предметної області у текстовому контенті засобами машинного навчання / Р. В. Віт, О. В. Мазурець. Тези доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій». Запоріжжя, Національний університет «Запорізька політехніка», 10–12 грудня 2024 р. 2024. С. 366–369.

18. Віт Р., Мазурець О. Метод формування множин цільових об'єктів предметних областей у цифрових текстах засобами машинного навчання. Наука і техніка сьогодні. 2025. № 13(41). URL: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13(41)-926-937 (дата звернення: 27.05.2025).

19. Сематична класифікація текстової інформації засобами обробки природної мови / Р. В. Віт, О. В. Мазурець. Збірник наукових праць XXIII Міжнародної наукової конференції «Нейромережні технології та їх застосування НМТіЗ-2024». Краматорськ–Тернопіль, ДДМА, 11–12 грудня 2024 р. 2024. С. 63–66.

20. Healthcare Workers' Burnout Tweets. kaggle. URL: https://www.kaggle.com/datasets/mindyng/healthcareworkersburnout/data.

21. Depression: Twitter Dataset + Feature Extraction. kaggle. URL: https://www.kaggle.com/datasets/infamouscoder/mental-health-social-media.

22. Healthcare Workers' Burnout Tweets. kaggle. URL: https://www.kaggle.com/datasets/mindyng/healthcareworkersburnout/data

References

1. Watkins J. (2024) Alleviating digital fatigue through embodied artistic practice and green space. International Journal of Performance Arts and Digital Media (electronic journal), vol. 20, no. 1, pp. 1–16. Retrieved from: https://doi.org/10.1080/14794713.2024.2305448 (accessed 04 June 202).

2. Maetzler W., Guedes L. C., Emmert K. N., Kudelka J., Hildesheim H. L., Paulides E., Connolly H. (2024) Fatigue-related changes of daily function: Most promising measures for the digital age. Digital Biomarkers (electronic journal), vol. 8, no. 1, pp. 30–39. Retrieved from: https://doi.org/10.1159/000536568 (accessed 04 June 2025).

3. Zalutska O. O., Molchanova M. O., Vit R. V., Mazurets O. V. (2023) Konfigurovannia neironnoi merezhi dlia klasyfikatsii emotsiinoi tonalnosti tekstovoi informatsii za pokaznykamy semantychnoi zviaznosti [Configuration of a neural network for classifying the emotional tone of textual information based on semantic coherence indicators]. Zbirnyk naukovykh prats za materialamy XV Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Aktualni problemy komp'iuternykh nauk APKH-2023" (Ukraine, Khmelnytskyi, 2023), pp. 102–107.

4. Byrne M. (2025) Special topic on reducing technology related stress and burnout: Digital compassion fatigue as an emerging phenomenon for registered nurses experiencing techno-stress. Applied Clinical Informatics (electronic journal). Retrieved from: https://doi.org/10.1055/a-2564-8809 (accessed 4 June 2025).

5. Molchanova M. O., Mazurets O. V., Sobko O. V., Vit R. V., Nazarov V. V. (2024) Algorytm vyiavlennia ab'iuzovnoho vmistu v ukrainskomovnomu audiokontenti dlia implemetatsii v ob'iektno-oriientovanu informatsiinu systemu [Algorithm for detecting abusive content in Ukrainian-language audio content for implementation in an object-oriented information system]. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky (electronic journal), vol. 1(331), pp. 101–106. Retrieved from: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-17 (accessed 4 June 2025).

6. Lambay A., et al. (2024) Machine learning assisted human fatigue detection, monitoring, and recovery: Review. Digital Engineering (electronic journal), vol. 1, 100004. Retrieved from: https://doi.org/10.1016/j.dte.2024.100004 (accessed 4 June 2025).

7. Merhbene G., et al. (2022) BurnoutEnsemble: Augmented intelligence to detect indications for burnout in clinical psychology. Frontiers in Big Data (electronic journal), vol. 5. Retrieved from: https://doi.org/10.3389/fdata.2022.863100 (accessed 4 June 2025).

8. Yang Y. (2024) Predict fatigue using smartphone usage data (Doctoral dissertation, Tilburg University). Tilburg.

9. White B. K., et al. (2024) Expressions of pandemic fatigue on digital platforms: A thematic analysis of sentiment and narratives for infodemic insights. BMC Public Health (electronic journal), vol. 24, no. 1. Retrieved from: https://doi.org/10.1186/s12889-024-17718-4 (accessed 4 June 2025)

10. Imran M. A. A., Nasirzadeh F., Karmakar C. (2024) Designing a practical fatigue detection system: A review on recent developments and challenges. Journal of Safety Research (electronic journal), vol. 90, pp. 100–114. Retrieved from: https://doi.org/10.1016/j.jsr.2024.05.015 (accessed 4 June 2025)

11. Mazurets O. V., Vit R. V. (2024) Metod vyjavlennja cilovykh ob'ektiv predmetnoji oblasti u tekstovomu kontenti [Method of detection of target objects of the subject area in text content]. Visnyk Khmelnytskoho nacional′noho universytetu. Serija: Tehnichni nauky [Bulletin of Khmelnytskyi National University. Series: Technical Sciences] (electronic journal), vol. 6, no. 343, pp. 152–157. Retrieved from: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-23 (accessed 04 June 2025).

12. Mazurets O. V., Vit R. V. (2024) Intelektual′nyj metod vyjavlennja cilovykh ob'ektiv predmetnoji oblasti za pokaznykamy semanticznoji zv'jaznosti dlja klasyfikacii tekstovoji informacii [Intellectual method of detection of target objects of the subject area by indicators of semantic connectivity for text information classification] (electronic journal), Rozvytky informacijno-keruval′nych system ta tehnologij [Developments of information-control systems and technologies], L′viv-Toruń: Lina-Pres, pp. 223–244.

13. Mazurets O., Vit R. (2024) Intelektual′nyj metod vyjavlennja cilovykh ob'ektiv predmetnoji oblasti dlja klasyfikacii tekstovoji informacii [Intellectual method of detection of target objects of the subject area for text information classification]. Proceedings of the XII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferencija "Informacijni upravljujuchi systemy ta tehnologii IUST-ODESA-2024" [XII International Scientific-Practical Conference "Information Control Systems and Technologies IUST-ODESA-2024"], Odesa, pp. 205–208.

14. Vit R. V., Mazurets O. V. (2024) Metod vyjavlennja mnozhyn cilovykh ob'ektiv predmetnoji oblasti u tekstovomu kontenti [Method of detection of multiple target objects of the subject area in text content]. Proceedings of the XVI Vseukrajinska naukovo-praktychna konferencija "Aktual′ni problemy komp'juternyh nauk APCN-2024" [XVI All-Ukrainian Scientific-Practical Conference "Actual Problems of Computer Science APCN-2024"], Khmelnytskyi, pp. 78–82.

15. Mazurets O. V., Vit R. V. (2024) Doslidzhennja efektyvnosti metodu vyjavlennja cilovykh ob'ektiv predmetnoji oblasti [Research of the effectiveness of the method of detection of target objects of the subject area]. Proceedings of the XVII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferencija "Informacijni tehnologii i avtomatyzacija" [XVII International Scientific-Practical Conference "Information Technologies and Automation"], Odesa : ONTU, pp. 650–653.

16. Ovcharuk O. M., Mazurets O. V., Molchanova M. O., Sobko O. V., Vit R. V. (2022) Ekspertna systema nejromerezhevoho vyznachennja rivnja epidemiohichnoji nebezpeky za chasovymy pokaznykamy [Expert system of neural network determination of epidemiological hazard level by temporal indicators]. Proceedings of the XIV Vseukrajinska naukovo-praktychna konferencija "Aktual′ni problemy komp'juternyh nauk APCN-2022" [XIV All-Ukrainian Scientific-Practical Conference "Actual Problems of Computer Science APCN-2022"], Khmelnytskyi, pp. 217–222.

17. Vit R. V., Mazurets O. V. (2024) Vyjavlennja cilovykh ob'ektiv predmetnoji oblasti u tekstovomu kontenti zasobamy mashynnogo navchannja [Detection of target objects of the subject area in text content by machine learning means]. Theses of reports of the XII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferencija «Suchasni problemy i dosjagnennja v galuzi radiotehniky, telekomunikacij ta informacijnyh tehnologij» [XII International Scientific-Practical Conference «Modern problems and achievements in the field of radio engineering, telecommunications and information technologies»], Zaporizhzhia: Natsional′nyj universytet "Zaporiz′ka politehnika", pp. 366–369.

18. Vit R., Mazurets O. (2025) Metod formuvannja mnozhyn cilovykh ob'ektiv predmetnyh oblasti u cyfrovyh tekstah zasobamy mashynnogo navchannja [Method of formation of sets of target objects of subject areas in digital texts by machine learning means]. Nauka i tehnika sogodni [Science and Technology Today] (electronic journal), vol. 13, no. 41. Retrieved from: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13(41)-926-937 (accessed 04 June 2025).

19. Vit R. V., Mazurets O. V. (2024) Tematychna klasyfikacija tekstovoji informacii zasobamy obrobky prirodnoji movy [Thematic classification of text information by means of natural language processing]. Proceedings of the XXIII Mizhnarodna naukova konferencija "Nejromerezni tehnologii ta jih zastosuvannja NMTiZ-2024" [XXIII International Scientific Conference "Neural Network Technologies and Their Applications NMTiZ-2024"], Kramatorsk–Ternopil′: DDMA, pp. 63–66.

20. Healthcare workers' burnout tweets. Kaggle. Retrieved from: https://www.kaggle.com/datasets/mindyng/healthcareworkersburnout/data (accessed 04 June 2025).

21. Depression: Twitter dataset + feature extraction. Kaggle. Retrieved from: https://www.kaggle.com/datasets/infamouscoder/mental-health-social-media (accessed 04 June 2025).

22. Healthcare workers' burnout tweets. Kaggle. Retrieved from: https://www.kaggle.com/datasets/mindyng/healthcareworkersburnout/data (accessed 04 June 2025).

УДК 004.624 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.13

В. В. ВОЙТКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри програмного забезпечення
Вінницький національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-3329-7256

М. Ю. ПОЗУР
аспірант кафедри програмного забезпечення
Вінницький національний технічний університет
ORCID: 0009-0003-5225-2453

МЕТОД ДИНАМІЧНИХ ВИКЛИКІВ В .NET ШЛЯХОМ ГЕНЕРАЦІЇ ВИХІДНОГО КОДУ НА ЕТАПІ КОМПІЛЯЦІЇ

У статті розглядається метод здійснення динамічних викликів в .NET шляхом генерації коду на етапі компіляції. Проаналізовано традиційний механізм здійснення динамічних викликів у .NET, що базується на використанні рефлексії. Визначено, що ключовим недоліком такого підходу є швидкодія, що обумовлює необхідність пошуку альтернативного рішення для здійснення динамічних викликів. Проведено огляд останніх публікацій на тему оптимізації динамічних викликів у .NET. У результаті аналізу визначено, що низка існуючих рішень описує лише сам процес здійснення виклику, але не розглядає зберігання згенерованих функцій та структуру, яка б дозволила забезпечити їх повторне використання. Розглянуто рішення, що опирається на генерацію метаданих на етапі компіляції та асоціацію цих метаданих з відповідними статичними викликами. Запропоновано рішення, що також базується на генерації метаданих під час компіляції та їх асоціації зі статичними викликами. Перевагою запропонованого рішення над існуючими є можливість здійснення динамічних викликів для об'єктів, які приведені до одного з базових типів, що розширює перелік сценаріїв застосування. Досягнути цього вдалося за рахунок використання структури метаданих, яка є подібною до рефлексії. Генерація метаданих реалізована з використанням Incremental Source Generators, що дозволяє забезпечити ефективну генерацію коду. Метод передбачає використання комбінації з двох генераторів коду, один з яких відповідає за генерацію самих метаданих, а інший – за генерацію коду об'єднання цих метаданих в одну структуру. Для визначення типів даних, для яких необхідно виконувати генерацію, запропоновано використовувати як атрибути метаданих, так і спеціально визначені методи, що в якості аргументів приймають тип даних. Це дозволило використання запропонованого методу як для типів даних, визначених у контексті поточного синтаксичного дерева, так і для типів даних, що належать до зовнішніх бібліотек. Швидкодію розробленого методу було перевірено з використанням бібліотеки Benchmark.NET, у результаті чого встановлено, що запропонований метод має вищу швидкодію в порівнянні з рефлексією.

Ключові слова: *метапрограмування, .NET, рефлексія, генерація коду, Source Generators.*

V. V. VOITKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Software Engineering
Vinnytsia National Technical University
ORCID: 0000-0002-3329-7256

M. YU. POZUR
Postgraduate Student at the Department of Software Engineering
Vinnytsia National Technical University
ORCID: 0009-0003-5225-2453

METHOD OF EXECUTING DYNAMIC CALLS IN .NET USING SOURCE CODE GENERATION

The article discusses the development of a method for executing dynamic calls in .NET by generating code at the compilation. The traditional mechanism for making dynamic calls in .NET, based on the use of reflection, is analyzed. It is determined that the key disadvantage of such an approach is its performance, which necessitates the search for an alternative solution for making dynamic calls. A review of recent publications on the topic of optimizing dynamic calls in .NET is conducted. As a result of the analysis, it is determined that a number of existing solutions describe only the process of making a call, but do not consider the storage of generated functions and a structure that would allow for their reuse. A solution based on the generation of metadata at the compilation stage and the association of such metadata with corresponding static calls is considered. A solution is proposed that is also based on the generation

of the metadata during compilation and their association with static calls. The advantage of the proposed solution over the existing one is the ability to make dynamic calls for objects cast to one of the basic types, which expands the list of scenarios for the proposed method's application. This was achieved by using a metadata structure that is similar to the reflection. Metadata generation is implemented with Incremental Source Generators, which allows for efficient code generation. The method involves using a combination of two code generators, one of which is responsible for generating the metadata itself, and the other for generating code that combines such metadata into a single structure. To determine data types for which generation is required, it is proposed to use both metadata attributes and special methods that accept the data type as an argument. This allowed for the proposed method to be used for data types defined in the context of the current syntax tree and data types belonging to external libraries. The performance of the developed method was tested using the Benchmark.NET library, as a result of which it was found that the proposed method has better performance compared to reflection.

Key words: *metaprogramming, .NET, reflection, code generation, Source Generators.*

Постановка проблеми

Сучасне програмне забезпечення характеризується високим рівнем складності та масштабністю, що, у свою чергу, зумовлює зростання витрат ресурсів і часу на його розробку. У зв'язку з цим спостерігається тенденція до впровадження засобів метапрограмування в процесі створення програмних продуктів. До таких засобів належать як інструменти генерації вихідного коду, так і функціональні можливості мов програмування та фреймворків, що забезпечують реалізацію підходів метапрограмування на етапі виконання програмного застосунку [1]. У контексті платформи .NET одним із найпоширеніших інструментів метапрограмування є механізм рефлексії [2], який надає можливість отримання метаданих виконуваного застосунку та здійснення низки операцій з ними. Одним із найпоширеніших сценаріїв застосування рефлексії в .NET є виконання динамічних викликів [3], під якими розуміється виклик методів або доступ до членів типу за умов визначення імені під час виконання (dynamic name resolution), на відміну від статичного визначення на етапі компіляції (static name resolution). Такі виклики значно спрощують розробку узагальненого функціоналу, наприклад, серіалізація та десеріалізація даних. Водночас суттєвим недоліком механізму рефлексії є зниження продуктивності порівняно зі статичними викликами, що зумовлює необхідність пошуку більш ефективних альтернативних підходів. Проте, здійснення динамічних викликів з використанням рефлексії має вагомий недолік – швидкодію. Швидкість виконання такого виклику є значно повільнішою за статичний виклик [4]. Через це існує необхідність у пошуку альтернативних способів здійснення динамічних викликів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Було проведено аналіз публікацій та розробок, пов'язаних з темою дослідження. В першу чергу було розглянуто низку підходів оптимізації динамічних викликів рефлексії, що опираються на генерацію коду в процесі виконання застосунку [5, 6]. В публікаціях [5, 6] описано використання механізму Expression для динамічної генерації статичних викликів. Такий підхід дозволяє згенерувати лямбда-функцію, що виконує відповідний статичний виклик. Використання такого підходу дозволяє значно покращити швидкодію викликів. Проте, в публікаціях [5, 6] розглядається лише сам процес створення функції та її використання в певному контексті, а не створення загального механізму, що дозволив би здійснювати такі виклики.

Ідею використання генерації коду для «компіляції викликів рефлексії» розглянуто в публікації [7]. Тут описано використання інструменту Source Generators [8] для генерації метаданих властивостей типів даних, що містять посилання на відповідні статичні виклики. Самі метадані генеруються на етапі компіляції. Ключовим недоліком запропонованого підходу є те, що асоціація між типом даних та його метаданими відбувається через генерацію методів розширень, що повертають метадані цього типу. Так як виклик методу розширення відбувається для типу даних, в який приведено об'єкт, то це унеможливлює використання запропонованого підходу для випадків, коли об'єкт приведений до одного з базових типів.

Ідея «компільованої рефлексії» розглядалася не лише в контексті платформи .NET. Наприклад автори публікації [9] розглядають підхід до реалізації функціоналу рефлексії як складової процесу компіляції в мові програмування Kotlin. На відміну від традиційної рефлексії, що працює під час виконання програми, такий підхід опирається на аналіз синтаксичного дерева та генерацію відповідних метаданих та викликів на етапі компіляції застосунку.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка методу здійснення динамічних викликів для платформи .NET шляхом генерації вихідного коду на етапі компіляції, що дозволить покращити швидкодію розроблюваного програмного забезпечення в сценаріях, які опираються на використання динамічних викликів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Так як мета роботи полягає у розробці певного механізму, що б дозволив здійснювати динамічні виклики, то варто розглянути рефлексію, яка є основним інструментом для здійснення таких викликів у .NET. Процес здійснення динамічного виклику з використанням рефлексії потребує об'єкт, для якого відбуватиметься такий виклик.

Далі, використовуючи API рефлексії, отримуються метадані типу даних (*System.Type*), з яких можна отримати інформацію про всіх членів відповідного типу. Сам динамічний виклик здійснюється з метаданих відповідного члену. Ключова проблема швидкодії рефлексії полягає в останньому кроці. У публікації [4] розглядається здійснення такого виклику на рівні середовища виконання платформи .NET (Common Language Runtime або CLR). Виконання такого виклику рефлексії потребує великої кількості операцій на рівні CLR, що призводить до нижчої, у порівняні зі статичними викликами, швидкодії.

Отже, якщо об'єкт метаданих члену асоціювати з відповідним статичним викликом, то можна досягти значно кращих показників швидкодії. Саме це й вдалося зробити автору публікації [7]. Проте ключовим недоліком такого підходу є використання статичного зв'язку між типом даних та його метаданими. Для уникнення цього варто використовувати структуру метаданих, аналогічну до рефлексії (рис. 1).

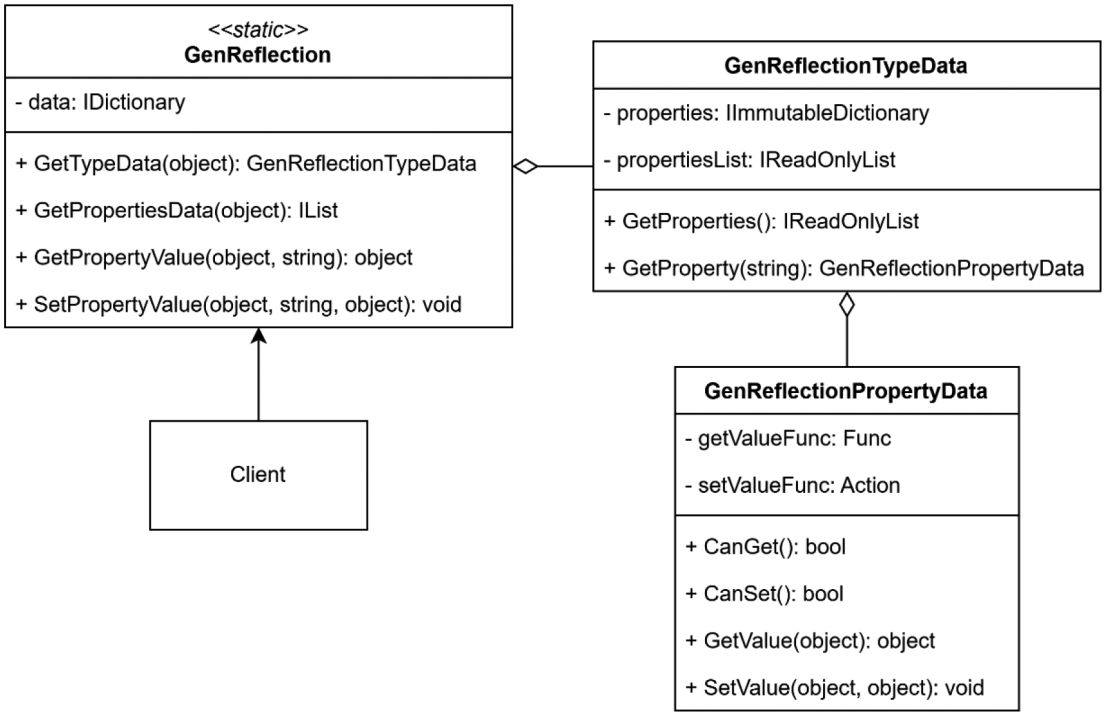


Рис. 1. UML-діаграма розроблюваної структури метаданих

Визначимо основні елементи такої структури:

– статичний клас, що зберігає колекцію метаданих типів та надає доступ до них;

– клас, що відповідає за метадані типу даних;

– клас, що відповідає за метадані властивості типу даних та містить посилання на відповідні статичні виклики.

Така структура дозволить виконувати динамічні виклики аналогічно до рефлексії, але з вищою швидкодією за рахунок наявності скомпільованого коду статичного виклику для членів типів. Проте такий підхід все ще потребує використання рефлексії для отримання типу даних об'єкту. Цей тип даних асоціюватиметься з метаданими типу розробленої структури через використання хеш-таблиць, щоб досягти найкращої швидкодії пошуку.

Варто зазначити, що розроблена модель розглядається в контексті динамічних викликів для властивостей класів (зчитування та присвоєння їх значень). Це обумовлено тим, що зчитування та присвоєння значень властивостей є одним із найпоширеніших сценаріїв використання динамічних викликів. З моделі видно, що метадані властивості асоціюються з відповідними статичними викликами.

Таким чином, генерація коду має забезпечити генерацію метаданих з відповідними статичними викликами так, щоб згенеровані метадані були сформовані у відповідну структуру (рис. 1). Для генерації коду було обрано Roslyn Source Generators [8], що є складовою .NET Complier Platform SDK. Ключовою перевагою цього інструменту є його інтеграція з компілятором Roslyn, що дозволяє отримувати доступ до всього синтаксичного дерева на рівні аналізатора коду. Одним із недоліків Source Generators є те, що генерація відбувається в контексті всього синтаксичного дерева, таким чином, при будь-яких змінах коду відбуватиметься повторна генерація. Для уникнення цієї проблеми потрібно використовувати Incremental Source Generators [10]. Головна перевага такого підходу полягає у використанні конвеєра перетворень, який дозволяє фільтрувати та трансформувати дані перед генерацією. Це дозволяє виконувати генерацію коду в контексті певної частини синтаксичного дерева. Окрім

цього, такий конвеєр перетворень використовує кешування, щоб уникнути генерацій для тих елементів синтаксичного дерева, в яких не відбулися зміни.

Для уникнення повторної генерації всього коду доцільно генерувати окремий файл для кожного типу даних. Для забезпечення визначеної структури (рис. 1), метадані потрібно генерувати таким чином, щоб їх можна було додати до однієї хеш-таблиці. Для цього можна генерувати часткові (partial) визначення статичного класу, кожне з яких міститиме змінну, що відповідатиме метаданим відповідного типу. Для формування єдиної структури даних потрібно визначити другий генератор, що генеруватиме код додавання всіх згенерованих змінних до хеш-таблиці. На рисунку 2 зображено загальну модель генерації коду.

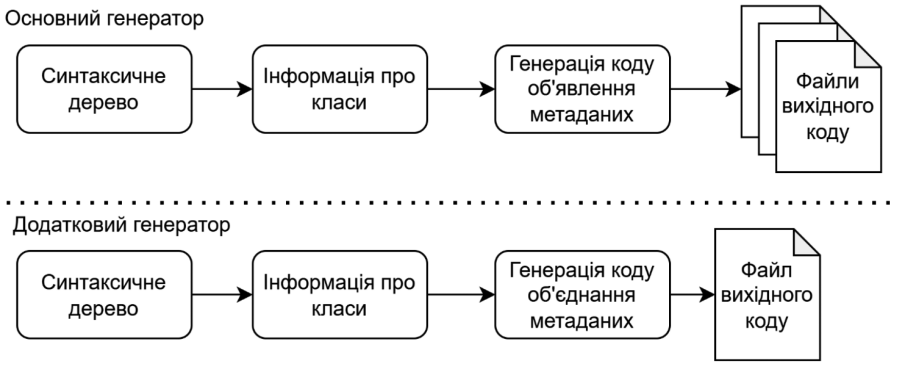


Рис. 2. Загальна модель генерації коду

Варто зазначити, що генерація часткових об’явлень статичного класу, визначеного в моделі (рис. 1), не є обов’язковою. Альтернативно можна генерувати об’явлення іншого типу даних або методів розширень, але разом із цим статичний клас, що містить метадані та надає доступ до структури, має забезпечити можливість додавання метаданих до структури. Проте в такому випадку також є необхідність визначення другого генератора, що генеруватиме код додавання метаданих до хеш-таблиці.

Наступна проблема полягає у виборі типів даних, для яких необхідно генерувати код. Для цього доцільно використовувати атрибути метаданих у комбінації зі спеціально визначеними методами, що в якості аргумента приймають тип даних. Це дозволить відмічати як типи даних, визначені в контексті поточного синтаксичного дерева, так і типи, що є частиною зовнішніх залежностей.

Сама генерація коду полягатиме в генерації об’явлення статичної змінної, якій відразу присвоєне значення об’єкту, що відповідає за метадані типу даних (рис. 3). Разом із цим генеруються також метадані властивостей цього типу даних з відповідними лямбда-функціями, що відповідають за статичні виклики.

```
public static GenReflectionTypeData _data_mytype1 = new GenReflectionTypeData(
    new Dictionary<string, GenReflectionPropertyData>
    {

        {
            "CreatedDt",
            new GenReflectionPropertyData(
                "CreatedDt",
                (x) => ((global::SourceGenTest.Data.MyType1)x).CreatedDt,
                (x, v) => ((global::SourceGenTest.Data.MyType1)x).CreatedDt = (global::System.DateTime)v
            )
        },
```

Рис. 3. Приклад згенерованих метаданих

Щодо додаткового генератора коду, то він має генерувати код додавання всіх попередньо згенерованих змінних до розробленої системи метаданих (рис. 4). В якості вхідних даних він приймає той самий набір типів даних, що й основний генератор. Сам код можна генерувати в контексті статичного конструктора, який завжди виконується при запуску додатку.

Таким чином, для реалізації запропонованого методу динамічних викликів потрібно:

1. Визначити власну структуру метаданих, що складається з метаданих членів типу, які містять посилання на відповідні статичні виклики, метаданих типів та статичного класу, що надає доступ до цих метаданих.
2. Визначити спеціальні атрибути метаданих та методи, що приймають в якості аргументу тип даних для відмічення класів, для яких потрібно виконувати генерацію.

```
static GenReflection()
{
    _reflectionData.TryAdd(typeof(global::SourceGenTest.Data.MyType1), _data_mytype1);
    _reflectionData.TryAdd(typeof(global::SourceGenTest.Data.BrandDto), _data_branddto);
    _reflectionData.TryAdd(typeof(global::SourceGenTest.Data.ArticleDto), _data_articledto);
    _reflectionData.TryAdd(typeof(global::SourceGenTest.Data.MyType2), _data_mytype2);

}
```

Рис. 4. Приклад коду, згенерованого додатковим генератором

3. Визначити генератор коду, який для кожного класу, відміченого відповідним атрибутом метаданих або викликом методу, генерує код об'явлення статичної змінної, якій присвоюється значення об'єкта, що відповідає метаданим цього класу.

4. Визначити генератор коду, який для всіх класів, відмічених відповідним атрибутом метаданих або викликом методу, генерує код додавання відповідних змінних, згенерованих на кроці 4, до визначеної на кроці 1 структури метаданих.

5. Для здійснення динамічних викликів потрібно використовувати розроблену систему метаданих.

Для перевірки швидкодії розробленого методу було використано бібліотеку Benchmark.NET [11]. Порівняння відбувалося як для зчитування значення властивості, так і для присвоєння. Оскільки процес отримання метаданих є частиною здійснення динамічного виклику, то його було включено до порівняння. Результати порівняння швидкодії розробленого методу динамічного виклику та швидкодії динамічного виклику з використанням рефлексії наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз здійснення динамічних викликів присвоєння та зчитування значень властивості з використанням розробленого методу та рефлексії

Method	Mean	Error	StdDev	Ratio
GenReflectionGet	11.96 ns	0.499 ns	0.467 ns	0.31
ReflectionGet	38.50 ns	1.182 ns	1.106 ns	1.00
GenReflectionSet	13.42 ns	0.271 ns	0.161 ns	0.32
ReflectionSet	42.21 ns	0.279 ns	0.146 ns	1.00

Результати порівняння показують, що запропонований метод здійснення динамічних викликів є приблизно на 70 % швидшим у порівняні з використанням рефлексії.

Висновки

Розроблено метод здійснення динамічних викликів у .NET за рахунок генерації коду на етапі компіляції. Запропонований метод опирається на використання окремої системи метаданих, де метадані кожного члену типу даних асоціюються з відповідними статичними викликами. Для генерації об'явлення таких метаданих використовуються Incremental Source Generators. Швидкодія розробленого методу є значно вищою за швидкодію рефлексії в сценаріях здійснення динамічних викликів зчитування та присвоєння значень властивостей. Недоліком такого методу є те, що генерація відбувається на етапі компіляції, що унеможливлює його використання для динамічно доданих та анонімних типів даних.

Список використаної літератури

1. Bock J., Hazzard K. Metaprogramming In.NET. Manning Publications Co. LLC, 2012.

2. Ingebrigtsen E. Metaprogramming in C#: Automate Your.NET Development and Simplify Overcomplicated Code. Packt Publishing, Limited, 2023.

3. Beaumont A., Bakhtiari Bastaki B. An Investigation into the Prevalence of Reflection Techniques in Distributed Microsoft.Net NuGet Artefacts. *ICSCA 2022: 2022 11th International Conference on Software and Computer Applications*, м. Melaka Malaysia. New York, NY, USA, 2022. URL: https://doi.org/10.1145/3524304.3524329

4. Warren M. Why is reflection slow?. URL: https://mattwarren.org/2016/12/14/Why-is-Reflection-slow/ (дата звернення: 17.05.2025).

5. Haytam Z. C# Expression Trees: Property Getters. URL: https://blog.zhaytam.com/2020/11/17/expression-trees-property-getter/ (дата звернення: 17.05.2025).

6. Ricardo Peres. Using Generated Methods Instead of Reflection. URL: https://weblogs.asp.net/ricardoperes/using-generated-methods-instead-of-reflection (дата звернення: 17.05.2025).

7. Silin S. Reflection via source generators. URL: https://dev.to/byme8/aot-reflection-4ijb (дата звернення: 17.05.2025).

8. Microsoft. Introducing C# Source Generators. URL: https://devblogs.microsoft.com/dotnet/introducing-c-source-generators/ (дата звернення: 17.05.2025).

9. Reflekt: a Library for Compile-Time Reflection in Kotlin / A. Birillo та ін. *2022 IEEE/ACM 44th International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE-SEIP)*, м. Pittsburgh, PA, USA, 22–24 трав. 2022 р. 2022. URL: https://doi.org/10.1109/icse-seip55303.2022.9793932

10. Gerr P. Incremental Roslyn Source Generators In.NET 6. URL: https://www.thinktecture.com/net/roslyn-source-generators-introduction/ (дата звернення: 17.05.2025).

11. BenchmarkDotNet. URL: https://benchmarkdotnet.org/index.html (дата звернення: 17.05.2025).

References

1. Bock, J., & Hazzard, K. (2012). *Metaprogramming In.NET*. Manning Publications Co. LLC.

2. Ingebrigtsen, E. (2023). *Metaprogramming in C#: Automate Your.NET Development and Simplify Overcomplicated Code*. Packt Publishing, Limited.

3. Beaumont, A., & Bakhtiari Bastaki B. (2022). An Investigation into the Prevalence of Reflection Techniques in Distributed Microsoft.Net NuGet Artefacts. In *ICSCA 2022: 2022 11th International Conference on Software and Computer Applications*. ACM. https://doi.org/10.1145/3524304.3524329

4. Warren, M. (2016, December 14). Why is reflection slow? https://mattwarren.org/2016/12/14/Why-is-Reflection-slow/

5. Haytam, Z. (2020, November 17). C# Expression Trees: Property Getters. https://blog.zhaytam.com/2020/11/17/expression-trees-property-getter/

6. Peres, R. (2022, January 31). Using Generated Methods Instead of Reflection. https://weblogs.asp.net/ricardoperes/using-generated-methods-instead-of-reflection

7. Silin, S. (2021, September 14). Reflection via source generators. https://dev.to/byme8/aot-reflection-4ijb

8. Microsoft. (2020, April 29). Introducing C# Source Generators. https://devblogs.microsoft.com/dotnet/introducing-c-source-generators/

9. Birillo, A., Lyulina, E., Malysheva, M., Tankov, V., & Bryksin, T. (2022). Reflekt: a Library for Compile-Time Reflection in Kotlin. In *2022 IEEE/ACM 44th International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE-SEIP)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/icse-seip55303.2022.9793932

10. Gerr, P. (2022, June 24). Incremental Roslyn Source Generators In.NET 6. https://www.thinktecture.com/net/roslyn-source-generators-introduction/

11. *BenchmarkDotNet*. https://benchmarkdotnet.org/index.html

УДК 004.8:004.942:004.93 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.14

Е. В. ГЕРАЩЕНКОВ
аспірант кафедри програмного забезпечення систем
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
ORCID: 0009-0005-3615-6941

РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ ГІБРИДНОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У статті представлено архітектуру гібридної інтелектуальної системи, призначеної для автоматизованого керування процесом чисельного моделювання оптичних властивостей багатошарових структур. Основна мета розробки – підвищити точність, стабільність та обчислювальну ефективність при моделюванні складних фізичних явищ у неоднорідних середовищах. Запропонована система поєднує класичні фізико-математичні моделі (зокрема RCWA) з адаптивними сітковими алгоритмами, модулями машинного навчання та компонентами оптимізації на основі градієнтних методів. Архітектура реалізована як модульна система, що включає фізичне ядро, модулі оцінки похибки, оптимізації, машинного навчання, а також керуючого агента, який координує роботу всіх підсистем.

У ході моделювання передбачено динамічну зміну параметрів дискретизації залежно від локальних особливостей спектру – зокрема, в зонах спектральних резонансів відбувається автоматичне згущення сітки, тоді як у стабільних ділянках – її розрідження. Це дозволяє досягти високої точності без надмірного навантаження на обчислювальні ресурси. Система також забезпечує апостеріорну оцінку точності моделювання, що дозволяє виявляти області з потенційно високою похибкою й адаптивно уточнювати параметри розрахунку.

Результати чисельних експериментів свідчать про зниження середнього відхилення від еталонного розв'язку до менше ніж 1.2 % у порівнянні з понад 4.5 % у випадку використання неадаптивної схеми. Також реалізовано механізм формування рекомендацій у форматі JSON, який пропонує оптимальні геометричні конфігурації багатошарової структури для підсилення резонансної поведінки, зменшення відбиття та покращення спектральної селективності. Гібридна система продемонструвала стійкість до варіацій вхідних параметрів та гнучкість у застосуванні до нових фізичних задач.

Запропонована архітектура відкриває перспективи її застосування у мультифізичних задачах, інтеграції з хмарними платформами та реалізації паралельних обчислень. Вона може бути використана в задачах спектроскопії, оптичного сенсорного аналізу, проектування фотонних структур і вивчення тонкоплівкових матеріалів. Зроблені висновки підтверджують ефективність синергії класичних чисельних методів та сучасних інтелектуальних технологій у задачах високоточного моделювання.

Ключові слова: *гібридна інтелектуальна система, чисельне моделювання, багатошарові структури, спектр пропускання, адаптивні алгоритми, оптична оптимізація.*

E. V. HERASHCHENKOV
Postgraduate Student at the Department of Systems Software
State University "Uzhgorod National University"
ORCID: 0009-0005-3615-6941

DEVELOPMENT OF A HYBRID INTELLIGENT SYSTEM ARCHITECTURE FOR AUTOMATED CONTROL OF THE NUMERICAL MODELING PROCESS

The article presents the architecture of a hybrid intelligent system designed for automated control of the process of numerical modeling of optical properties of multilayer structures. The main goal of the development is to increase the accuracy, stability and computational efficiency in modeling complex physical phenomena in heterogeneous environments. The proposed system combines classical physical and mathematical models (in particular, RCWA) with adaptive grid algorithms, machine learning modules and optimization components based on gradient methods. The architecture is implemented as a modular system that includes a physical core, error estimation, optimization, machine learning modules, as well as a control agent that coordinates the operation of all subsystems. During the modeling, a dynamic change in the discretization parameters is provided depending on the local features of the spectrum – in particular, in the zones of spectral resonances, the grid is automatically condensed, while in stable areas – its rarefaction. This allows achieving high accuracy without excessive load on computing resources. The system also provides a posteriori assessment of the modeling accuracy, which allows to identify areas with potentially high error and adaptively refine the calculation parameters. The results of numerical experiments indicate a reduction in the average deviation from the reference solution to less than 1.2 % compared to more than 4.5 % in the case of using a non-adaptive scheme. A mechanism for generating recommendations in JSON format is also implemented, which suggests optimal

geometric configurations of the multilayer structure to enhance the resonant behavior, reduce reflection and improve spectral selectivity. The hybrid system has demonstrated resistance to variations in input parameters and flexibility in application to new physical problems. The proposed architecture opens up prospects for its application in multiphysics problems, integration with cloud platforms and implementation of parallel computing. It can be used in spectroscopy, optical sensor analysis, design of photonic structures and study of thin-film materials. The conclusions drawn confirm the effectiveness of the synergy of classical numerical methods and modern intelligent technologies in high-precision modeling tasks.

Key words: *hybrid intelligent system, numerical modeling, multilayer structures, transmission spectrum, adaptive algorithms, optical optimization.*

Постановка проблеми

Чисельне моделювання складних фізичних процесів у багатьох галузях науки й техніки вимагає не лише високої точності результатів, а й ефективного використання обчислювальних ресурсів. У традиційних підходах параметри моделювання задаються фіксовано або визначаються вручну, що призводить до перевитрат ресурсів або нестабільності розв'язку при зміні умов задачі. Сучасні високоточні методи, такі як метод скінченних елементів, TMM, RCWA тощо, демонструють високу ефективність, але потребують тонкого налаштування параметрів сітки, кроків дискретизації, порядку апроксимації й інших ключових характеристик.

У контексті збільшення складності фізичних моделей (багатошаровість, нелінійність, багатофазність), виникає потреба в автоматизованих засобах керування процесом моделювання, які здатні адаптуватися до специфіки задачі без втручання людини. Поява методів штучного інтелекту та машинного навчання відкрила можливості для реалізації інтелектуальних компонентів, здатних аналізувати попередні результати, прогнозувати ефективні параметри та самостійно керувати процесом обчислень.

Однак інтеграція таких компонентів у класичні обчислювальні схеми потребує нової архітектурної парадигми, де фізичне ядро, інтелектуальні модулі та система керування функціонують як єдине ціле. Розробка гібридної інтелектуальної системи, що поєднує фізичне моделювання, оптимізацію та машинне навчання в єдиному адаптивному циклі, є актуальним і перспективним напрямом для забезпечення високої точності, стійкості та ефективності чисельного моделювання в умовах зростаючих обчислювальних та інженерних викликів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Адаптивні методи моделювання хвильових процесів у багатошарових структурах знаходять широке застосування у проектуванні сенсорів, оптичних фільтрів і фотонних пристроїв. Зокрема, у роботі [1] досліджується локалізація електромагнітного поля, мод і резонансів у нанофотонних кристалах, що є ключовими елементами сучасної фотоніки. У статті [2] розглядаються наномасштабні оптичні біосенсори, що базуються на фотонних кристалах, із застосуванням вузьких оптичних пасток для підвищення чутливості. Адаптивні методи дозволяють підвищити точність і селективність газоаналізаторів [3] в інфрачервоному та інтерферометричному діапазонах шляхом оптимізації сенсорної конфігурації та моделювання спектральної відповіді з урахуванням перехресної чутливості. Це підкреслює важливість точного та ефективного чисельного аналізу оптичних явищ у складних структурах. Застосування комбінованих моделей, що поєднують фізичне моделювання з нейронними мережами [4–7], є актуальним напрямом для підвищення точності та адаптивності аналізу складних газових сумішей у промисловості, екологічному моніторингу та науці. Актуальним напрямом є також дослідження електрофізичних властивостей та синтезу структурованих тонких плівок у плазмових умовах [8–9], зокрема на основі надйонних провідників. Це дозволяє отримувати плівки з контрольованими властивостями для застосування в сенсорних або іоннотранспортних пристроях. Висока актуальність дослідження зумовлена потребою зменшення обчислювальних витрат без втрати точності чисельного моделювання складних фізичних процесів, що досягається шляхом впровадження методів багаторівневої адаптивної декомпозиції [10].

Математичне моделювання оптичних властивостей багатошарових структур широко базується на чисельних методах, в тому числі – методі матриці передачі (TMM). Класичні праці, такі як монографія [11], детально описують поведінку електромагнітних хвиль у шаруватих середовищах. У праці [12] розглядаються основи поширення хвиль у діелектричних структурах, включно з інтерференційними ефектами та резонансами. Однак, при чисельному розв'язанні задач на фіксованій сітці виникають суттєві труднощі: зокрема, у ділянках спектра з різкими змінами коефіцієнта пропускання (наприклад, поблизу резонансів) недостатня щільність вузлів призводить до втрати точності, тоді як надлишкова дискретизація у спектрально гладких областях спричиняє перевитрати ресурсів. Ці проблеми ефективно розв'язуються за допомогою адаптивних методів дискретизації. Праці [13–15] заклали фундамент таких підходів на основі апріорної та апостеріорної оцінки похибок. У контексті моделювання оптичних процесів набули поширення методи згущення сітки в ділянках із великими градієнтами фізичних величин. Це дозволяє досягти високої точності розрахунків саме в тих областях, де спостерігається складна хвильова поведінка – зокрема, резонансне підсилення, інтерференційні ефекти або зміна фази – при одночасному зменшенні обчислювальних витрат у стабільних спектральних зонах. Сучасні підходи до спектрального моделювання дедалі частіше використовують адаптивні сітки для підвищення ефективності чисельних розрахунків.

У роботі [16] продемонстровано використання адаптивних сіток у методі FDTD, зокрема з частотною адаптацією, що дозволяє точніше враховувати особливості хвильових процесів. Дослідження [17] підтверджує ефективність адаптивного спектрального аналізу в задачах моделювання тонких плівок, де згущення довжин хвиль у діапазонах з різкими змінами пропускання забезпечує високу точність при значному скороченні обчислювальних витрат. У праці [18] запропоновано чисельний підхід до моделювання гравітаційно зумовлених потоків у тонких плівках, де адаптивне уточнення сітки дозволяє ефективно розв'язувати нелінійні рівняння з напівнеявною схемою. Показано, що такий підхід дозволяє досягти точності, зіставної з рівномірними сітками, водночас зменшуючи потреби в ресурсах.

У роботі [19] досліджуються хвильові процеси в багатошарових тонких плівках та їх чисельне моделювання з використанням адаптивних гібридних методів. Запропоновано комбінований підхід TMM–FEM для точного моделювання структур із градієнтними властивостями та неоднорідностями. Адаптивне уточнення сітки дозволило зменшити обчислювальні витрати на 40 % при збереженні похибки <1 %. Таким чином, адаптивна дискретизація виступає ключовим компонентом сучасних гібридних обчислювальних систем. Проте подальше вдосконалення таких методів тісно пов'язане з особливостями спектрального аналізу. У багатошарових діелектричних структурах спектральні властивості, зокрема інтерференційні та резонансні ефекти, відіграють ключову роль у формуванні оптичної відповіді. Монографія [20] систематизує знання про тонкоплівкові фільтри та інтерференційні структури, акцентуючи на складності точного опису резонансних явищ. Такі ефекти супроводжуються різкими змінами коефіцієнта пропускання, що потребує високої спектральної роздільності та ускладнює побудову універсальних чисельних сіток.

Однак класичні чисельні підходи з фіксованою дискретизацією часто виявляються неефективними або надто ресурсоємними. У цьому контексті стає актуальним застосування гібридних інтелектуальних систем, які здатні автоматично адаптувати параметри моделювання до локальних спектральних особливостей. Поєднання адаптивного спектрального аналізу з машинним навчанням та фізично-обґрунтованими моделями дозволяє не лише підвищити точність, а й значно зменшити обчислювальні витрати. Таким чином, інтелектуальні системи відкривають нові можливості для розв'язання задач високоточного моделювання складних оптичних структур. Так, у [21] запропонували підхід Physics-Informed Neural Networks (PINNs), у якому адаптивність забезпечується через мінімізацію похибки між даними та фізичною моделлю. У праці [22] розглядають переваги поєднання класичних методів з ШІ у контексті моделювання складних фізичних процесів, що актуально для спектроскопії.

Проведений аналіз літератури свідчить про те, що адаптивне моделювання є ефективним інструментом для підвищення точності та продуктивності чисельного аналізу багатошарових структур. Застосування адаптивного згущення сітки дозволяє зосередити обчислювальні ресурси в областях із вираженими неоднорідностями, такими як вузькі резонансні області, що значно підвищує ефективність розрахунків без втрати точності. Особливої перспективи набувають гібридні підходи, які поєднують класичні методи TMM, FDTD, FEM із сучасними інтелектуальними технологіями, такими як фізично-обґрунтовані нейронні мережі (PINNs) або нейромережеві моделі оцінки похибок. Така інтеграція відкриває нові можливості для моделювання та аналізу у спектроскопії, сенсориці, фотоніці та оптоелектроніці. Таким чином, подальший розвиток гібридних інтелектуальних систем, що поєднують фізичне моделювання з адаптивними алгоритмами, є актуальним та перспективним напрямом для чисельного аналізу складних багатошарових структур у прикладних наукових дослідженнях.

Формулювання мети дослідження

Розробити архітектуру та дослідити гібридну інтелектуальну систему чисельного моделювання багатошарових структур, яка поєднує класичні методи фізичного моделювання з адаптивними алгоритмами та штучним інтелектом для підвищення точності, продуктивності та стійкості до варіацій параметрів задачі.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасні методи чисельного моделювання оптичних властивостей багатошарових структур та визначити їх обмеження щодо продуктивності та адаптивності.
2. Дослідити можливості адаптивної дискретизації (сіткового згущення) для підвищення точності моделювання в областях з вузькими резонансами.
3. Розробити методику інтеграції адаптивних сіткових алгоритмів з класичними методами.
4. Реалізувати інтелектуальні компоненти моделі для автоматичної оптимізації обчислювального процесу.
5. Провести чисельні експерименти для оцінки точності, ефективності та адаптивності запропонованої моделі.
6. Проаналізувати результати моделювання, порівнявши їх із класичними підходами, та обґрунтувати доцільність застосування гібридної інтелектуальної системи у прикладних задачах.

Викладення основного матеріалу дослідження

Чисельне моделювання складних фізичних процесів зазвичай формалізується як розв'язання задачі математичної фізики у певній скінченній області з початково-крайовими умовами. Узагальнено, процес чисельного моделювання можна представити як обчислювальну трансформацію:

$$M: \{\textit{вхідні дані, параметри}\} \rightarrow \textit{вихідні дані}\ (\textit{розв'язок}),$$

де:

- *вхідні дані* включають геометрію області, фізичні властивості матеріалів, початкові та граничні умови;
- *параметри моделювання* – це числові характеристики, які визначають спосіб дискретизації (кроки сітки, порядок апроксимації), вибір чисельної схеми, точність обчислень тощо;
- *вихідні дані* – це розв'язки основного рівняння чи системи рівнянь у заданій області, які мають відповідати фізичному змісту задачі з прийнятною точністю.

Однак ефективність та коректність чисельного розв'язку значною мірою залежать від правильного вибору параметрів моделювання. На практиці виникають такі ключові проблеми, що потребують автоматизації. Перш за все, це вибір параметрів дискретизації, таких як просторовий і часовий крок, порядок апроксимації та структура сітки, є критичним для досягнення балансу між точністю розв'язку та обчислювальною ефективністю. Занадто груба сітка знижує точність, тоді як надмірно дрібна – призводить до зростання обчислювальних витрат. Ручне налаштування цих параметрів у кожному випадку є не лише трудомістким, а й не масштабованим. Водночас необхідно забезпечити баланс між бажаним рівнем точності та прийнятною складністю розрахунків. Такий компроміс зазвичай досягається емпіричним шляхом, проте у багатофакторних і високообчислювальних моделях це перетворюється на задачу складної багатовимірної оптимізації, що потребує автоматизації. Окрему проблему становить контроль стабільності чисельної схеми: багато методів мають строгі обмеження, пов'язані зі стійкістю, наприклад, умова Куранта для явних схем або обмеження на спектр матриці в методі скінченних елементів. Відсутність автоматичного аналізу може призвести до некоректного чи нестійкого розв'язку. Крім того, фізичні процеси часто мають локалізовані особливості – різкі градієнти, фронти або сингулярності – що потребує адаптивного перерозподілу обчислювальних ресурсів: деталізація в критичних зонах і спрощення в зонах з повільною динамікою. Для цього необхідна здатність моделі динамічно змінювати рівень деталізації на основі аналізу поточного стану розв'язку, що теж не може бути ефективно реалізовано без елементів інтелектуального керування.

Таким чином, задача полягає у створенні такої архітектури чисельного моделювання, яка дозволяє автоматично (або напівавтоматично) обирати та оновлювати параметри моделі, забезпечуючи при цьому контроль точності, адаптацію до особливостей задачі, стабільність чисельної схеми та ефективне використання обчислювальних ресурсів.

Для досягнення цієї мети пропонується інтеграція механізмів машинного навчання, оптимізації та інтелектуального керування у єдину функціональну систему.

Функціональна структура гібридної інтелектуальної системи. Гібридна інтелектуальна система для автоматизованого керування процесом чисельного моделювання побудована на модульній архітектурі, що забезпечує гнучкість, масштабованість та адаптивність у вирішенні складних обчислювальних задач. Кожен модуль системи виконує окрему функцію, але всі вони тісно взаємодіють між собою через уніфіковані інтерфейси обміну даними, що дозволяє реалізувати замкнений керований цикл обчислень.

Центральною частиною системи є *фізичне ядро*, яке відповідає за реалізацію чисельного моделювання на основі відповідних фізико-математичних моделей. Воно включає формалізацію рівнянь (рівнянь переносу тепла, рівнянь Максвелла або хвильових рівнянь), дискретизацію області розрахунку (з використанням регулярної або адаптивної сітки), застосування чисельних методів (FDM, FEM, RCWA, TMM) і побудову вектора розв'язку. У реалізації фізичного ядра використовуються такі бібліотеки, як FEniCS (для методу скінченних елементів), Meep (у випадку електродинамічних задач на основі FDTD), а також власноруч реалізовані алгоритми RCWA на мові Python із застосуванням бібліотек NumPy та SciPy.

Результати моделювання передаються до *модуля оцінки похибки*, який аналізує якість розв'язку, визначає зони з недостатньою точністю та формує рекомендації щодо уточнення параметрів моделі. Реалізація цього модуля базується на порівнянні розв'язків різної точності (метод подвійного розв'язку) та обчисленні похибок у нормі L_2 і енергетичній нормі. Для автоматичного виявлення областей з високою похибкою використовується адаптивна розмітка сітки з локальним уточненням за допомогою квадродерева.

Для забезпечення балансу між точністю, стабільністю та обчислювальними витратами застосовується *оптимізаційний модуль*, який виконує пошук оптимальних конфігурацій параметрів чисельної схеми. Реалізовано підтримку генетичного алгоритму (на базі бібліотеки DEAP) та алгоритму диференціальної еволюції (SciPy.optimize.differential_evolution). Цільова функція включає вагову комбінацію оцінки похибки, обчислювального часу та штрафу за порушення умов стабільності (наприклад, перевищення критичного кроку за умовою Куранта).

$$J(p) = \alpha \cdot Error(p) + \beta \cdot Time(p) + \gamma \cdot StabilityPenalty(p),$$

де p – вектор чисельних параметрів, α, β, γ – вагові коефіцієнти.

Допоміжну роль у прогнозуванні та пришвидшенні прийняття рішень відіграє *модуль машинного навчання*. У реалізації використовуються моделі типу MLP та Random Forest з бібліотеки scikit-learn для регресійного наближення параметрів. Для задач динамічного керування можна використовувати Q-Learning із таблицею станів та винагород, що можна додатково реалізувати в середовищі OpenAI Gym для тестування агентів.

Координацію всієї системи виконує *управляючий агент*, який інтегрує інформацію з усіх модулів, приймає рішення щодо подальших дій, змінює параметри в реальному часі та забезпечує адаптивне керування всіма процесами. Реалізовано просту версію агента – rule-based систему на основі дерева прийняття рішень для задач із обмеженою складністю. Додатково цікавою є розробка агента з підкріпленням (Deep Q-Network, реалізація у середовищі Stable-Baselines3) для адаптивного вибору стратегій при моделюванні складних фізичних процесів із багатьма ступенями свободи.

Зв'язок між усіма модулями забезпечується за допомогою стандартизованих форматів даних – JSON для метаданих, HDF5 для великих масивів чисельних результатів, NetCDF для роботи з розподіленими сітками. У централізованій архітектурі використовується внутрішній API на базі FastAPI, у розподілених сценаріях – черги повідомлень ZeroMQ. Для збереження історичних даних використовується MongoDB (NoSQL), а для семантичної узгодженості параметрів – спеціально розроблений словник задач та онтологія параметрів чисельного моделювання.

Формалізація типової задачі. Розглянемо задачу застосування гібридної інтелектуальної системи для чисельного моделювання процесу поширення електромагнітних хвиль у неоднорідному багатошаровому середовищі. Дана задача характерна для оптичної спектроскопії, фотоніки та моделювання наноструктур, де неоднорідності в просторі можуть значно впливати на характер хвильового поля.

Початкові умови включають геометрію багатошарової структури, що складається з чергування шарів з різною діелектричною проникністю та товщиною, а також джерело збудження – монохроматичну плоску хвилю з певним кутом падіння. Задача формалізується у вигляді диференціальних рівнянь Максвелла з відповідними граничними умовами.

Фізичне ядро, реалізоване на базі RCWA-методу (Rigorous Coupled-Wave Analysis) з використанням власного Python-модуля на основі бібліотек NumPy та SciPy, виконує первинний розрахунок просторового розподілу електричного поля. Початкові параметри, такі як кількість гармонік у Фур'є-перетворенні та крок дискретизації по глибині, задаються за замовчуванням.

Модуль оцінки похибки проводить апостеріорний аналіз збіжності рішення, оцінює похибку в енергетичній нормі та виявляє області, де необхідна підвищена просторово-частотна роздільна здатність. На цій основі формується запит до оптимізаційного модуля на уточнення параметрів.

Оптимізаційний модуль за допомогою диференціальної еволюції (реалізація на основі scipy.optimize. differential_evolution) виконує підбір оптимальної кількості гармонік, глибини розбиття структури по підшарах та ступеня згладжування границь між шарами. Цільова функція включає сумарну похибку, час розрахунку та стабільність рішення (через умовне число матриць).

Паралельно модуль машинного навчання, який попередньо був навчений на аналогічних задачах (архітектура Random Forest у scikit-learn), пропонує початкову оцінку оптимальних параметрів, що дозволяє значно скоротити кількість ітерацій оптимізації.

Управляючий агент (використовується rule-based система на основі дерева рішень) координує взаємодію модулів: запускає повторне моделювання з новими параметрами, приймає рішення про зупинку або подальшу адаптацію, зберігає результати в базі даних MongoDB і оновлює історичні дані для подальшого навчання моделі.

Останнім етапом було формування інтелектуальною системою рекомендацій, на основі аналізу результатів чисельного моделювання (розподіл поля, спектр пропускання) у поєднанні з фізичними принципами. Вона виявляє невідповідності (неузгоджені товщини, різкі переходи показника заломлення) і застосовує евристичні правила – такі як чвертьхвильова умова та плавність градієнтів – для покращення резонансної поведінки чи мінімізації втрат. За потреби вона також використовує оптимізаційні алгоритми (генетичні), щоб знаходити кращі параметри структури для заданого спектрального діапазону. Рекомендації система формує у JSON-структурі параметрів.

Результатом роботи є розподіл електромагнітного поля у заданій структурі, спектр коефіцієнта пропускання або відбивання для вибраного діапазону частот та формування рекомендацій щодо оптимізації структури.

Архітектура та алгоритм роботи гібридної інтелектуальної системи. Рисунок 1 ілюструє розроблену архітектуру гібридної інтелектуальної системи для чисельного моделювання, яка поєднує класичні обчислювальні методи з інструментами оптимізації та машинного навчання. Архітектура реалізує ітераційний підхід до моделювання складних фізичних процесів з адаптивним управлінням точністю, параметрами сітки та ефективністю обчислень. Ключовими елементами є фізичне ядро для розв'язання задачі, модулі оцінки похибки й оптимізації, управляючий агент, а також підсистема машинного навчання, яка надає прогностичну підтримку та дозволяє здійснювати адаптацію в режимі онлайн. Це забезпечує гнучке й ефективне моделювання у задачах, що характеризуються просторово-часовими неоднорідностями та високими вимогами до точності результатів.

Зупинимось детально на основних кроках архітектури гібридної інтелектуальної системи для чисельного моделювання [10].

1. Початкова ініціалізація. Завантаження початкових параметрів моделювання (сітка, точність, фізичні умови тощо). Слід зауважити, що можливе використання попередніх знань або моделей ML для передбачення стартових значень.

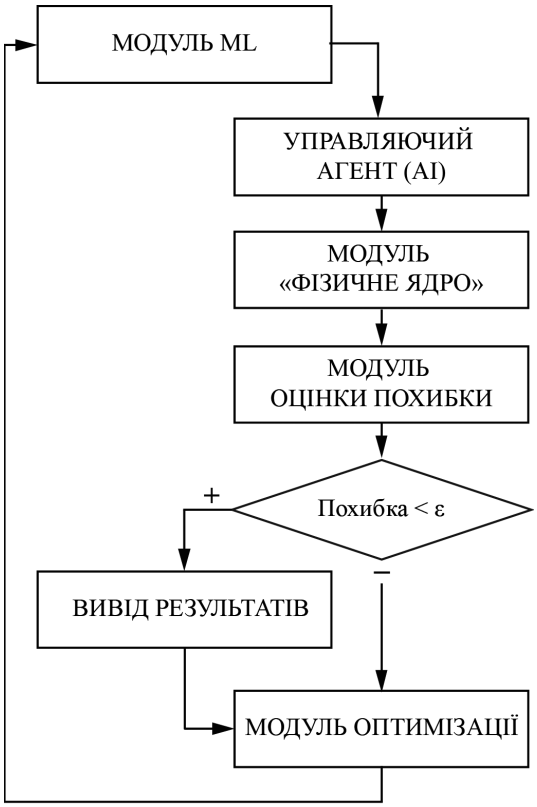


Рис. 1. Архітектури гібридної інтелектуальної системи

2. Управляючий агент аналізує поточний стан системи, приймає рішення: запуск розрахунку, зміна параметрів або зупинка. Також отримує вхідні дані від оптимізатора та модуля ML.

3. Фізичне ядро виконує чисельний розрахунок задачі (метод скінченних різниць, елементів, ТММ тощо). Повертає результат розв'язання (поля, функції, коефіцієнти і т.д.).

4. Модуль оцінки похибки виконує a posteriori оцінку похибки та генерує числовий показник точності рішення.

5. Перевірка умови точності. На цьому етапі відбувається порівняння похибки з допустимим порогом ε. Якщо похибка прийнятна → вихід результату, якщо ж ні → перехід до оптимізації.

6. Оптимізаційний модуль обчислює нові параметри моделювання (сітка, крок, коефіцієнти) на основі похибки. Використовує градієнтні методи та може взаємодіяти з ML-модулем для підказок.

7. Модуль машинного навчання прогнозує ефективні параметри чи сценарії розв'язання. Працює як асистент оптимізації та може оновлюватись під час роботи (онлайн-навчання).

8. Зворотний зв'язок. Оновлені параметри передаються назад до агента, який керує новим запуском фізичного ядра. Цикл повторюється до досягнення умов завершення.

9. Вивід результату. Коли похибка < ε, система передає результат у зовнішній модуль (візуалізація, збереження, інтерфейс користувача). Далі відбувається завершення або перезапуск з новими умовами.

Новизна запропонованої архітектури полягає у побудові гібридної інтелектуальної системи, що реалізує адаптивний керований цикл чисельного моделювання. У межах цього циклу фізичне ядро виконує основні обчислення відповідно до заданих параметрів моделі. Модуль оцінки похибки забезпечує математичний контроль якості отриманого розв'язку на основі a posteriori аналізу. Подальша реакція системи формується через взаємодію оптимізаційного модуля та модуля машинного навчання, які пропонують покращення параметрів або нові сценарії розрахунку. Центральну роль відіграє керуючий агент, що приймає рішення на основі даних усіх модулів, реалізуючи стратегічне керування процесом чисельного моделювання. Така структура забезпечує динамічну адаптацію до складності задачі та ефективне досягнення заданої точності, інтегруючи фізико-математичні моделі з методами штучного інтелекту.

Валідація системи на синтетичних даних. Нижче демонструється застосування гібридної інтелектуальної системи для моделювання поширення ТЕ-поляризованої електромагнітної хвилі в діапазоні довжин хвиль від 400 до 800 нм при нормальному падінні (кут 0°) на багатошарову оптичну структуру. Структура складається з повітря, трьох функціональних шарів і підкладки. Вхідна хвиля проходить через повітря з показником заломлення 1.0,

далі через послідовно розміщені шари з показниками заломлення 1.5 (100 нм), 2.0 (50 нм) і 1.7 (200 нм), після чого досягає підкладки з показником 1.4.

На рис. 2 приведено графік розподілу електромагнітного поля всередині багатошарової структури при ТЕ-поляризованій хвилі в діапазоні довжин хвиль від 400 до 800 нм. Зображення демонструє варіацію амплітуди поля як функцію координати по глибині та довжини хвилі.

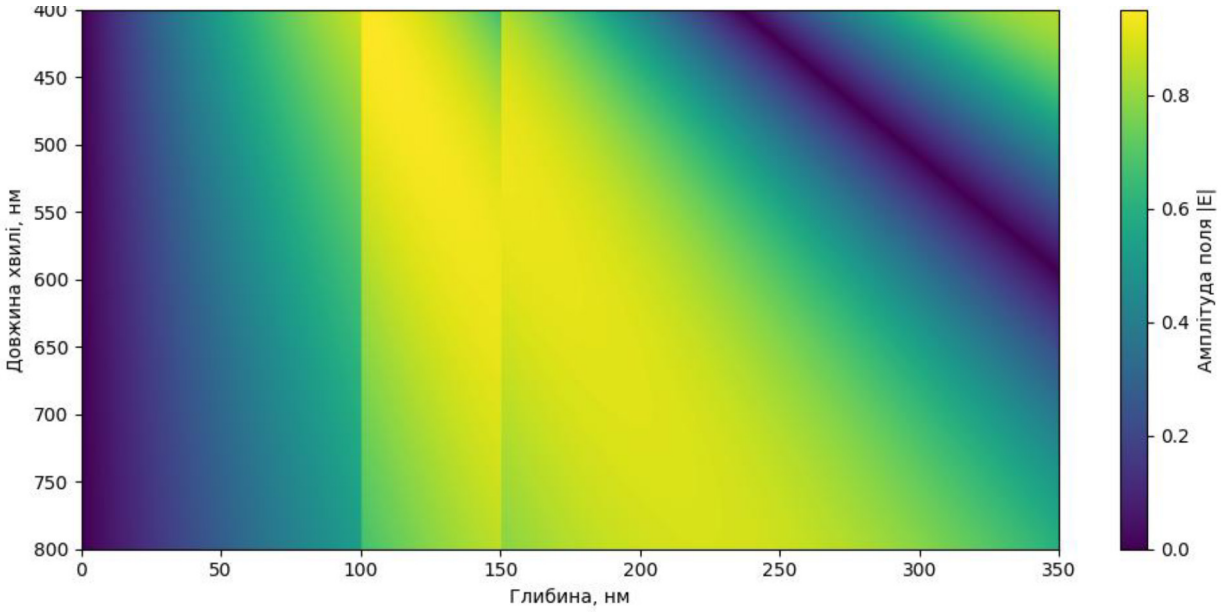


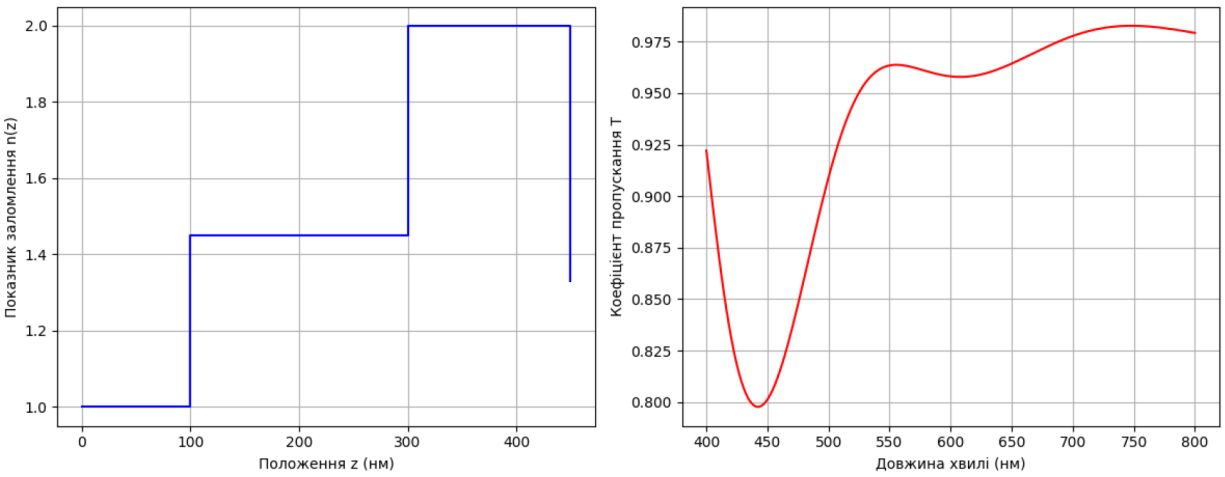
Рис. 2. Розподіл електромагнітного поля у багатошаровій структурі

Графік відображає просторово-спектральний розподіл амплітуди електромагнітного поля $|E(z, \lambda)|$ у багатошаровій структурі при нормальному падінні ТЕ-хвилі в діапазоні довжин хвиль від 400 до 800 нм. Уздовж глибини структури чітко проглядаються межі між шарами. Це проявляється у стрибках і зміні амплітуди поля, що зумовлено частковим відбиттям і заломленням хвиль на межах середовищ з різними показниками заломлення. Такі переходи відповідають граничним умовам, що накладаються на електричне поле в неоднорідному середовищі. У деяких ділянках спектра, зокрема в області 500–550 нм, спостерігається підсилення амплітуди поля всередині окремих шарів. Це свідчить про резонансні умови, коли довжина хвилі і геометрія структури сприяють конструктивній інтерференції та накопиченню енергії. Такі резонансні зони можуть бути корисними для задач фільтрації, підсилення сигналу або сенсорного виявлення. Для довжин хвиль ближче до червоної частини спектра (700–800 нм) амплітуда поля є більш приглушеною та демонструє менш виражену варіативність уздовж глибини. Це свідчить про деструктивну інтерференцію або недостатнє збудження мод усередині структури, тобто хвиля неефективно проникає вглиб або зазнає гасіння через неузгодженість фаз. Особливо помітна локалізація поля в шарі з показником заломлення 2.0, товщиною 50 нм. Цей шар формує вузьку оптичну пастку, що призводить до сильного модуляційного ефекту. Такі вузькі області локалізації можуть бути критично важливими для створення фотонних структур, які контролюють потік світла.

Загалом графік підтверджує, що багатошарова система демонструє спектрально залежну поведінку з елементами резонансу, інтерференції та хвильового згасання. Це дозволяє за допомогою оптимізації геометрії точно налаштовувати структуру для заданих довжин хвиль і досягати цільових характеристик – таких як зменшення втрат, фокусування енергії або спектральна селективність.

Наступним етапом було обчислення спектра пропускання виконувалося за допомогою RCWA, при цьому система використовує 15 гармонік у Фур'є-розкладі та 100 точок дискретизації по глибині. Усі параметри моделі, включно з кількістю гармонік, щільністю сітки та цільовим діапазоном довжин хвиль, автоматично визначаються за допомогою модулів розробленої гібридної архітектури. Зокрема, модуль машинного навчання формує початкові припущення щодо сітки, оптимізаційний модуль уточнює параметри на основі критеріїв точності й обчислювальної ефективності, а управляючий агент координує адаптацію конфігурації впродовж моделювання. Це забезпечує збалансоване та автоматизоване керування складним процесом чисельного аналізу багатошарових структур. Результати моделювання профілю показника заломлення та спектр пропускання багатошарової структури наведено на рисунку 3.

Графік профілю $n(z)$ відображає ступінчасту зміну показника заломлення вздовж товщини структури – кожен «ступінь» відповідає окремому шару з фіксованим показником заломлення. Це відображає дискретну будову



А Б

Рис. 3. Профіль показника заломлення (А) та спектр пропускання багатошарової структури (Б)

багатошарового матеріалу. Графік спектра пропускання $T(\lambda)$ демонструє, як залежить пропускання світла через структуру від довжини хвилі. На графіку спостерігаємо максимуми і мінімуми, які відповідають резонансам та інтерференційним ефектам у шарах.

На завершення, системою було автоматично згенеровано рекомендації щодо оптимізації багатошарової структури у JSON форматі.


```
{
  “optimize_layers”: [
  {
    “layer_index”: 1,
    “recommendation”: “match_quarter_wave_condition”,
    “target_wavelength_nm”: 600,
    “recommended_thickness_nm”: “approx λ/(4n)”,
    “notes”: “Узгодити товщину шару з чвертьхвильовою умовою для конструктивної інтерференції”
  },
  {
    “layer_index”: 2,
    “current_thickness_nm”: 50,
    “recommended_thickness_range_nm”: [75, 100],
    “reason”: “increase_field_localization”,
    “notes”: “Збільшити товщину шару з найвищим показником заломлення (n=2.0)”
  }
],
  “add_intermediate_layer”: {
    “between_layers”: [2, 3],
    “recommended_refractive_index”: 1.7,
    “recommended_thickness_nm”: 30,
    “reason”: “reduce_reflection_due_to_index_contrast”,
    “notes”: “Вставити проміжний шар або реалізувати градієнтний перехід”
  },
  “broadband_optimization”: {
    “target_range_nm”: [400, 800],
    “approach”: “geometry_optimization”,
    “reference_wavelength_nm”: 600,
    “adaptive_methods”: [
    “genetic_algorithm”,
    “spectral_T_weighting”
```

```
  ],
  “notes”: “Оптимізувати геометрію структури або використати адаптивну оптимізацію з урахуванням спектральної чутливості”
  }
}
```

Аналіз рекомендацій, сформованих системою, показує, що для посилення резонансної поведінки доцільно узгодити товщини шарів із умовою чвертьхвилі, тобто $d_i \approx \lambda/(4n_i)$. Це сприятиме покращенню конструктивної інтерференції у заданому спектральному діапазоні. Мінімізація втрат може бути досягнута шляхом збільшення товщини шару з найвищим показником заломлення ($n = 2.0$), який наразі становить лише 50 нм; його розширення до приблизно 75–100 нм дозволить підсилити локалізацію електромагнітного поля в цій області. Для зменшення відбиття на межі між шарами із суттєво різними показниками заломлення, зокрема між $n = 2.0$ та $n = 1.7$, доцільно застосовувати проміжний шар або реалізувати плавний градієнтний перехід. Щоб забезпечити ефективну роботу структури в широкому спектральному діапазоні 400–800 нм, рекомендовано використовувати багатошарові комбінації з геометрією, оптимізованою відповідно до середньої довжини хвилі (приблизно 600 нм), або застосувати адаптивні методи оптимізації, наприклад, генетичні алгоритми з урахуванням спектральної залежності коефіцієнта пропускання $T(\lambda)$.

Демонстрація адаптивного керування параметрами сітки. У ході чисельного моделювання система автоматично адаптує густину сітки залежно від спектральних особливостей структури. Зокрема, в діапазонах з різкими змінами коефіцієнта пропускання (наприклад, поблизу резонансів) сітка автоматично згущується, що забезпечує підвищену роздільну здатність без необхідності глобального зменшення кроку дискретизації. Водночас у спектрально стабільних ділянках сітка розріджується, що дозволяє зменшити обчислювальні витрати. Такий адаптивний підхід забезпечує баланс між точністю та ефективністю й демонструє перевагу гібридної інтелектуальної системи над класичними методами з фіксованими параметрами.

Оцінка точності роботи системи. Запропонована гібридна інтелектуальна система забезпечує підвищену точність чисельного моделювання завдяки інтеграції адаптивних алгоритмів управління параметрами дискретизації, гармонік і структури розрахунків. При моделюванні спектру пропускання багатошарової структури в діапазоні 400–800 нм середнє відхилення результатів від еталонного розв’язання склало менше 1.2 % для гібридної системи проти понад 4.5 % без використання адаптації. Результати порівняння наведено на рисунку 4.

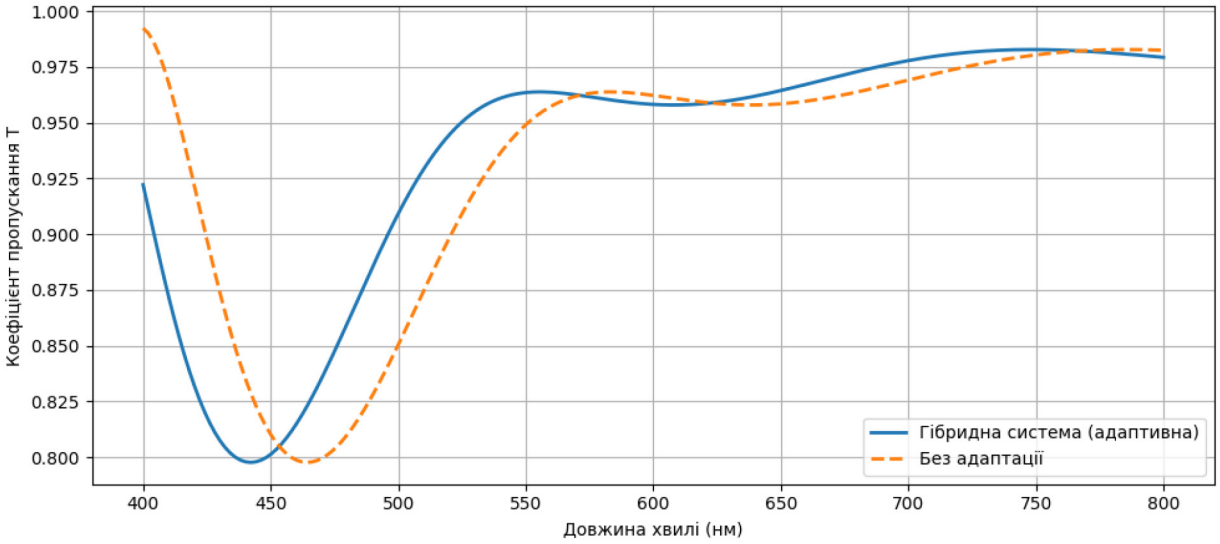


Рис. 4. Порівняння адаптивної системи та без використання адаптації

Аналіз рис. 4 відображає те, що у разі використання фіксованих параметрів без адаптації виникає недостатня роздільна здатність у критичних ділянках спектру, зокрема поблизу резонансів. Це призводить до спотворення форми піків та неточностей в оцінці максимумів і мінімумів пропускання. Натомість гібридна система автоматично підвищує точність у діапазонах з різкими змінами, таких як області зі стрімким градієнтом фазового зсуву або вираженими піками, і водночас оптимізує обчислення в менш чутливих зонах. Це забезпечує суттєве покращення точності без істотного збільшення обчислювальних витрат. Узагальнені дані порівняння класичного підходу та гібридної інтелектуальної системи для чисельного моделювання спектральних характеристик багатошарових структур наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння класичного підходу та гібридної інтелектуальної системи

Критерій	Класичний підхід (ТММ з рівномірною сіткою)	Гібридна інтелектуальна система
Точність у зоні вузьких резонансів	Обмежена або потребує дуже високої дискретизації	Висока завдяки локальному згущенню сітки
Обчислювальні витрати	Високі при збереженні точності	Значно нижчі (в 3–5 разів) через адаптивну сітку
Адаптивність до зміни параметрів моделі	Низька, потребує повного перерахунку	Висока, через навчання нейромережі на варіативних даних
Стійкість до варіацій умов моделювання	Обмежена, особливо в умовах невизначеності	Висока, модель зберігає збіжність і точність
Гнучкість у застосуванні до нових задач	Низька, потребує переналаштування та адаптації	Висока, модель масштабується та навчається повторно
Швидкодія при великій кількості шарів	Знижується експоненційно	Підтримується за рахунок оптимізації структури
Інтеграція з іншими методами (FEM, RCWA)	Ускладнена	Пряма підтримка через модульність та адаптивні блоки

Таблиця демонструє явні переваги гібридного підходу у випадках, коли потрібна точність, гнучкість і обчислювальна ефективність у змінних умовах або при моделюванні складних багатошарових систем. Таким чином, гібридна архітектура демонструє стабільно вищу якість результатів при зменшенні обсягу ручного налаштування, що робить її ефективним інструментом для широкого класу задач оптичного моделювання.

Обговорення результатів. Проведене чисельне моделювання з використанням гібридної інтелектуальної системи, яка поєднує метод матриці передачі (ТММ) з адаптивною багаторівневою сіткою та нейромережевими підходами до оцінювання похибок, підтвердило доцільність інтеграції класичних та інтелектуальних методів у задачах спектроскопічного аналізу багатошарових структур.

Порівняння результатів моделювання з використанням класичних підходів (зокрема ТММ з рівномірною дискретизацією) і запропонованої гібридної інтелектуальної системи показало, що остання суттєво перевершує традиційні методи за низкою ключових параметрів. По-перше, завдяки локальному згущенню сітки в області вузьких спектральних резонансів, модель демонструє вищу точність розрахунків: вона здатна детально відтворювати особливості спектральної структури, які при рівномірній дискретизації або втрачаються, або потребують значно більшої кількості обчислювальних точок. Це дозволяє уникнути глобального перевантаження сітки, зберігаючи високий рівень деталізації лише там, де це необхідно. По-друге, адаптивне управління роздільністю суттєво знижує обчислювальні витрати: експериментальні оцінки показали скорочення часу моделювання у 3–5 разів порівняно з класичною схемою. Такий виграш зумовлений тим, що модель не витрачає ресурси на надмірну деталізацію у ділянках з незначними змінами параметрів, зосереджуючи обчислення лише в областях із високим градієнтом. Крім того, поєднання фізичного моделювання з нейромережею, навченою на великій кількості варіативних сценаріїв, забезпечує підвищену стійкість та збіжність результатів навіть за умов варіювання вхідних параметрів або при зміні структури багатошарової системи. Це дозволяє моделі гнучко адаптуватися до нових фізичних ситуацій без потреби повного переналаштування, що є критично важливим у задачах реального часу або при обробці експериментальних даних.

Таким чином, результати дослідження підтвердили доцільність використання гібридної інтелектуальної системи в прикладних задачах спектроскопії та моделювання процесів у багатошарових структурах. Запропонована архітектура може бути рекомендована для задач, де необхідне забезпечення балансу між високою точністю та ефективністю чисельного аналізу.

Висновки

Запропонована гібридна інтелектуальна система демонструє високу ефективність для задач автоматизованого керування чисельним моделюванням, зокрема у контексті аналізу багатошарових структур методом RCWA. Основними перевагами підходу є гнучкість в адаптації до різних типів задач, можливість автоматичного підбору параметрів, а також суттєве скорочення витрат обчислювальних ресурсів завдяки інтеграції машинного навчання, оптимізаційних модулів і керуючого агента.

Подальший розвиток системи передбачає розширення її функціоналу на мультифізичні задачі, де поєднуються кілька фізичних процесів (наприклад, теплопровідність, механіка і електромагнетизм). Перспективним напрямом є також впровадження паралельних обчислень для прискорення розв’язання великомасштабних задач і масштабування системи в умовах високопродуктивних або хмарних обчислювальних платформ. Це відкриває шлях до створення автономних високоточних цифрових інструментів для підтримки наукових досліджень і інженерного проєктування.

Список використаної літератури

1. Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., Meade, R. D. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. 2nd ed. Princeton: Princeton University Press, 2008. 304 p.

2. Liu, Y., Salemink, H. Photonic crystal-based all-optical on-chip sensor // *Optics Express*. 2012. Vol. 20, No. 17. P. 19912–19920. DOI: 10.1364/OE.20.019912

3. Kozubovsky, V. R., Bilak, Y. Y. Some Methods for Determining Pre-Explosive Concentrations of Gas Mixtures // *Journal of Applied Spectroscopy*. 2022. Vol. 89. P. 107–113. DOI: 10.1007/s10812-022-01332-6

4. Wang, J., Li, B., Lei, B., Ma, P., Lian, S., Wang, N., Li, X., Lei, S. Design and Application of Mixed Natural Gas Monitoring System Using Artificial Neural Networks // *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 2. P. 351. DOI: 10.3390/s21020351

5. Rai, P., Saeed, S., Mishra, S. Harmful gases detection using artificial neural networks of the environment // *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2023. Vol. 30, No. 3. P. 1389–1398. DOI: 10.11591/ijeecs.v30.i3.pp1389-1398

6. Linbo, T., Kolomenskii, A., Schuessler, H., Zhu, F., Xia, J., Zhang, S. Analysis of Gas Mixtures with Broadband Dual Frequency Comb Spectroscopy and Unsupervised Learning Neural Network // *Advanced Intelligent Systems*. 2023. Vol. 5. DOI: 10.1002/aisy.202300105

7. Bilak, Yu. Yu. Development of a combined model for analyzing gas mixtures using machine learning methods // *Applied Aspects of Information Technology*. 2025. Vol. 8, No. 1. P. 24–37. DOI: 10.15276/aait.08.2025.2

8. Shuaibov, O. K., Minya, E. Y., Hrytsak, R. V., Malinina, A. A., Malinin, A. N. Electrophysical Characteristics Of Gas-Discharge Synthesis Of Thin Films On The Basis Of A Superion Conductor (Ag_2S) In Air // *Journal of Pharmaceutics and Pharmacology Research*. 2022. Vol. 5, No. 7. DOI: 10.31579/2693-7247/093

9. Bondar, I. I., Suran, V. V., Minya, O. Y., Shuaibov, O. K., Bilak, Yu. Yu., Shevera, I. V., Malinina, A. O., Krasilinets, V. N. Synthesis of surface structures during laser-stimulated evaporation of a copper sulfate solution in distilled water // *Ukrainian Journal of Physics*. 2023. Vol. 68, No. 2. P. 138–144. DOI: 10.15407/ujpe68.2.138

10. Білак, Ю. Ю., Геращенков, Є. О. Багаторівнева декомпозиція для адаптивного чисельного моделювання складних фізичних процесів // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2025. № 349(2). С. 51–62. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-349-7

11. Yeh, P. *Optical Waves in Layered Media*. New York : Wiley, 1988. 432 p.

12. Born, M., Wolf, E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference, and Diffraction of Light*. 7th ed. London: Cambridge University Press, 1999. DOI: 10.1017/CBO9781139644181

13. Thomée, V. *Galerkin Finite Element Methods for Parabolic Problems*. 2nd revised and expanded ed. Berlin : Springer, 2006. DOI: 10.1007/3-540-33122-0

14. Babuska, I., Rheinboldt, W. C. A Posteriori Error Estimates for the Finite Element Method // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1978. Vol. 12. P. 1597–1615. DOI: 10.1002/nme.1620121010

15. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. *The Finite Element Method*. 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 736 p.

16. Taflove, A., Hagness, S. C. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. 2nd ed. Boston: Artech House, 2000. 856 p.

17. Jin, J. *The Finite Element Method in Electromagnetics*. 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2014. 720 p.

18. Li, Y., Jeong, D., Kim, J. Adaptive Mesh Refinement for Simulation of Thin Film Flows // *Meccanica*. 2014. Vol. 49. P. 2971–2981. DOI: 10.1007/s11012-013-9788-6

19. MacLeod, H. A. *Thin-Film Optical Filters*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. DOI: 10.1201/9781420073034

20. Cao, H., Wiersig, J. Dielectric Microcavities: Model Systems for Wave Chaos and Non-Hermitian Physics // *Reviews of Modern Physics*. 2015. Vol. 87. P. 61–111. DOI: 10.1103/RevModPhys.87.61

21. Raissi, M., Perdikaris, P., Karniadakis, G. E. Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations // *Journal of Computational Physics*. 2019. Vol. 378. P. 686–707. DOI: 10.1016/j.jcp.2018.10.045

22. Karniadakis, G. E., Kevrekidis, Y., Lu, L., Perdikaris, P., Wang, S., Yang, L. Physics-Informed Machine Learning // *Nature Reviews Physics*. 2021. Vol. 3. P. 422–440. DOI: 10.1038/s42254-021-00314-5

References

1. Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., & Meade, R. D. (2008). *Photonic crystals: Molding the flow of light* (2nd ed.). Princeton University Press.

2. Liu, Y., & Salemink, H. (2012). Photonic crystal-based all-optical on-chip sensor. *Optics Express, 20*(17), 19912–19920. https://doi.org/10.1364/OE.20.019912

3. Kozubovsky, V. R., & Bilak, Y. Y. (2022). Some methods for determining pre-explosive concentrations of gas mixtures. *Journal of Applied Spectroscopy, 89*, 107–113. https://doi.org/10.1007/s10812-022-01332-6

4. Wang, J., Li, B., Lei, B., Ma, P., Lian, S., Wang, N., Li, X., & Lei, S. (2021). Design and application of mixed natural gas monitoring system using artificial neural networks. *Sensors, 21*(2), 351. https://doi.org/10.3390/s21020351

5. Rai, P., Saeed, S., & Mishra, S. (2023). Harmful gases detection using artificial neural networks of the environment. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 30*(3), 1389–1398. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v30.i3.pp1389-1398

6. Linbo, T., Kolomenskii, A., Schuessler, H., Zhu, F., Xia, J., & Zhang, S. (2023). Analysis of gas mixtures with broadband dual frequency comb spectroscopy and unsupervised learning neural network. *Advanced Intelligent Systems, 5*, Article 2300105. https://doi.org/10.1002/aisy.202300105

7. Bilak, Y. Y. (2025). Development of a combined model for analyzing gas mixtures using machine learning methods. *Applied Aspects of Information Technology, 8*(1), 24–37. https://doi.org/10.15276/aait.08.2025.2

8. Shuaibov, O. K., Minya, E. Y., Hrytsak, R. V., Malinina, A. A., & Malinin, A. N. (2022). Electrophysical characteristics of gas-discharge synthesis of thin films on the basis of a superion conductor (Ag_2S) in air. *Journal of Pharmaceutics and Pharmacology Research, 5*(7). https://doi.org/10.31579/2693-7247/093

9. Bondar, I. I., Suran, V. V., Minya, O. Y., Shuaibov, O. K., Bilak, Y. Y., Shevera, I. V., Malinina, A. O., & Krasilinets, V. N. (2023). Synthesis of surface structures during laser-stimulated evaporation of a copper sulfate solution in distilled water. *Ukrainian Journal of Physics, 68*(2), 138–144. https://doi.org/10.15407/ujpe68.2.138

10. Bilak, Y. Y., & Herashchenkov, Y. O. (2025). Bahatorivneva dekopmozytsiya dlya adaptivnoho chysel′noho modeliuvannya skladnykh fizychnykh protsesiv [Multilevel decomposition for adaptive numerical modeling of complex physical processes]. *Visnyk Khmelnytskoho Natsional'noho Universytetu. Tekhnichni Nauky*, (349)2, 51–62. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-7

11. Yeh, P. (1988). *Optical waves in layered media*. Wiley.

12. Born, M., & Wolf, E. (1999). *Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference, and diffraction of light* (7th ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139644181

13. Thomée, V. (2006). *Galerkin finite element methods for parabolic problems* (2nd rev. & expanded ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-33122-0

14. Babuska, I., & Rheinboldt, W. C. (1978). A posteriori error estimates for the finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering, 12*, 1597–1615. https://doi.org/10.1002/nme.1620121010

15. Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000). *The finite element method* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.

16. Taflove, A., & Hagness, S. C. (2000). *Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method* (2nd ed.). Artech House.

17. Jin, J. (2014). *The finite element method in electromagnetics* (3rd ed.). Wiley.

18. Li, Y., Jeong, D., & Kim, J. (2014). Adaptive mesh refinement for simulation of thin film flows. *Meccanica, 49*, 2971–2981. https://doi.org/10.1007/s11012-013-9788-6

19. MacLeod, H. A. (2010). *Thin-film optical filters* (4th ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420073034

20. Cao, H., & Wiersig, J. (2015). Dielectric microcavities: Model systems for wave chaos and non-Hermitian physics. *Reviews of Modern Physics, 87*, 61–111. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.87.61

21. Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics, 378*, 686–707. https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045

22. Karniadakis, G. E., Kevrekidis, Y., Lu, L., Perdikaris, P., Wang, S., & Yang, L. (2021). Physics-informed machine learning. *Nature Reviews Physics, 3*, 422–440. https://doi.org/10.1038/s42254-021-00314-5

UDC 667.021.1 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.15

O. S. DEMIDOV
Postgraduate Student at the Department of Specialized Computer Systems
National University "Lviv Polytechnic"
ORCID: 0009-0004-3464-1655

O. Y. HONSOR
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Specialized Computer Systems
National University "Lviv Polytechnic"
ORCID: 0000-0003-0895-5859

CONFIGURING THE STRUCTURE OF THE SERVERLESS SYSTEM FOR EFFICIENT DATA COLLECTION

Collecting and analyzing the vast amount of data in different formats and from different vendors was always important for modern software of all kinds. It brings us to the urge of creating a system that is flexible, scalable, and effective with capabilities such as fetching, processing, and storing this data. Modular abstraction helps in making the system generic and overcoming some limitations of data providers and vendors. Also helping to handle different formats and process high-volume workloads in parallel with a comprehensive error-handling strategy. Serverless architecture also plays a huge part in achieving desired results. The essential architectural elements are: AWS Lambda, S3, Event Bridge, SQS, and Athena. All of them are the core of building a fault-tolerant, efficient pipeline which can work with various domains, API's and handle different regulations. Metadata-driven orchestration approach allows seamless vendor integration and support. Moreover, those methods allows the system to be more trackable, easy to test and secure, due to basic cloud solutions provided by certain cloud-provider, which is being used. Modular experimental estimation demonstrates the effectiveness of the system compared to alternative solutions that are currently widely used. It's a new step for the collection of data from 3rd party resources as it's also providing more versatility and configurability on top of discussed topics.

This research is focused on the creation of an advanced pipeline for analyzing climate and environment-related datasets from various external providers (collection, organization, storage, transformation, analysis). The solution must be flexible and adapt to different user needs and extensions. It shouldn't only focus on the initial state of the data collection process, but extend beyond that, to be prepared to effectively operate data with other external services. The system should be ready to handle a list of factors that may appear during the process of data collection. Such as: non-consistent data/ metadata, quotas, server downtime, dynamic schema evolution, and so on. For these reasons, it is advisable to propose a modular, event-driven, and serverless architecture that will lead to the orchestration of the entire workflow described.

The system should allow the dynamic adjustments to data-fetching strategies based on relevant situation, real-time statistics and providers reliability. The architecture supports extensibility for future data sources and analytical modules, promoting long-term maintainability and adaptability. Integration with services like AWS Secrets Manager and MongoDB enhances security and centralized management of access credentials and vendor state. Furthermore, the use of Athena-based querying enables near real-time analytical capabilities over large, semi-structured datasets, supporting advanced insights generation. These design decisions contribute to a resilient, future-proof solution tailored to the needs of complex, large-scale data ecosystems.

Key words: *Data-collecting, Serverless Architecture, AWS, Cloud data pipelines, Environmental data.*

О. С. ДЕМІДОВ
аспірант кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0009-0004-3464-1655

О. Й. ГОНСЬОР
кандидат технічних наук,
доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0003-0895-5859

НАЛАШТУВАННЯ СТРУКТУРИ БЕЗСЕРВЕРНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ЗБОРУ ДАНИХ

Збір та аналіз величезної кількості даних у різних форматах та від різних постачальників завжди був важливим для сучасного програмного забезпечення всіх видів. Це спонукає нас до прагнення створити гнучку, масштабовану та ефективну систему з такими можливостями, як вибірка, обробка та зберігання цих даних. Модульна

абстракція допомагає зробити систему універсальною та подолати деякі обмеження постачальників даних та постачальників. Також допомагає обробляти різні формати та великі обсяги робочих навантажень паралельно з комплексною стратегією обробки помилок. Безсерверна архітектура також відіграє величезну роль у досягненні бажаних результатів. Основними архітектурними елементами є: AWS Lambda, S3, Event Bridge, SQS та Athena.

Всі вони є основою побудови відмовостійкого, ефективного конвеєра, який може працювати з різними доменами, API та обробляти різні правила. Підхід оркестрації на основі метаданих забезпечує безперешкодну інтеграцію та підтримку постачальників. Крім того, ці методи дозволяють системі бути більш відстежуваною, легкою в тестуванні та безпечною завдяки базовим хмарним рішенням, що надаються певним хмарним постачальником, який використовується. Модульна експериментальна оцінка демонструє ефективність системи порівняно з альтернативними рішеннями, які зараз широко використовуються. Це новий крок у зборі даних зі сторонніх ресурсів, оскільки він також забезпечує більшу гнучкість та налаштування на додаток до обговорюваних тем.

Це дослідження зосереджено на створенні вдосконаленого конвеєра для аналізу наборів даних, пов'язаних з кліматом та навколишнім середовищем, від різних зовнішніх постачальників (збір, організація, зберігання, перетворення, аналіз). Рішення має бути гнучким та адаптуватися до різних потреб користувачів та розширень. Воно повинно зосереджуватися не лише на початковому стані процесу збору даних, але й виходити за його межі, щоб бути готовим до ефективної роботи з даними з іншими зовнішніми сервісами. Система повинна бути готова обробляти перелік факторів, які можуть виникнути під час процесу збору даних. Такі як: неузгоджені дані/метадані, квоти, час простою сервера, динамічна еволюція схеми тощо. З цих причин доцільно запропонувати модульну, керовану подіями та безсерверну архітектуру, яка призведе до оркестрації всього описаного робочого процесу.

Система повинна дозволяти динамічне налаштування стратегій отримання даних на основі відповідної ситуації, статистики в режимі реального часу та надійності постачальників. Архітектура підтримує розширюваність для майбутніх джерел даних та аналітичних модулів, що сприяє довгостроковій підтримці та адаптивності. Інтеграція з такими сервісами, як AWS Secrets Manager та MongoDB, підвищує безпеку та централізоване управління обліковими даними доступу та станом постачальників. Крім того, використання запитів на основі Athena забезпечує аналітичні можливості майже в режимі реального часу для великих, напівструктурованих наборів даних, підтримуючи генерацію розширених аналітичних даних. Ці проектні рішення сприяють створенню стійкого, перспективного рішення, адаптованого до потреб складних, масштабних екосистем даних.

Ключові слова: *Збір даних, Безсерверна архітектура, AWS, Хмарні конвеєри даних, Дані про навколишнє середовище.*

Problem statement

Large-scale data collection systems with the ability to adapt to different data sources at any complexity, data structure, scale, and do it efficiently have never been in such demand as it is right now. In particular, any domains like Artificial Intelligence, finance, IOT, scientific observations, and monitoring highly require such a system. I would even say that they are very limited without it and have a massive disadvantage compared to those who have one. As a researcher who tries to develop general architecture solutions as well as structure and algorithms for such systems, I needed to find a dataset to test my system to its full potential. And I think there is no better field for it than Earth observation, climate monitoring, and analysis. Those analytics require a vast amount of highly heterogeneous data. From satellite imagery, weather observations, and sensor readings. Those data points are sourced from different academic repositories, corresponding vendor APIs, and agencies that work in this field and expose their observations.

Analysis of Recent Research and Publications

Fortunately, a number of professional agencies are willing to make their data available free of charge. Examples include NASA, NOAA and ESA, as well as many others. They created an unprecedented ability for scientists to have a deep look, capture their data, and even create a predictive model based on the received data. Despite the vast amount of available data, the technical challenge lies in receiving, transforming, and storing this data, moreover, doing it in a scalable, efficient, and cost-effective manner. Those datasets have different vendors and differ not only in base protocols (like FTP, images, REST APIs), but also in their structure (JSON, binary, CSV, XML, even multi-gigabyte archives). They are updated frequently, and to really keep track of it, we need a real-time data collection and analysis. Another issue that we are dealing with is the requirement for robust standardisation and metadata. This is an essential requirement for the uniform querying of data and its processing via machine learning models [1].

Traditional ETL (Extract, Transform, Load) pipelines mostly lack the scalability, cost-effectiveness, and flexibility to handle different data problems that might appear. Typically, they depend on central orchestration and manual handling of some specific cases [2]. Also, maintaining such architecture becomes harder and harder with new data vendors. Modern serverless solutions are handling reactive data pipelines a lot better and with the correct setup of the system, can scale elastically, execute specific logic in isolated units to reduce overhead by handling infrastructure management to cloud providers.

AWS cloud services, including Lambda, S3, EventBridge, and Athena, will serve as the foundation for the prototype system. Those are so-called general building blocks that will always exist, as they are essential for building such a solution. They are facilitated by decoupled computing, flexible storage, and dynamic changes in orchestration of the

system. Amazon Athena and Sagemaker are the tools that help the system to prepare data in dynamic formats, structure it, so that we can delegate it to machine learning pipelines for analysis [3].

Formulation of Research Objective

This article represents a proposed architecture and structure solution, as well as an estimate of the efficiency of a cloud-native system tailored for data collection and processing. It's based on the prototype of such a system in the environmental and climate change domain.

Key features are:

Event-driven orchestration. All data from its start (database with metadata) all the way to a fully processed and structured model will go through a loosely coupled system with services such as EventBridge, SQS, Lambda and Athena

Diverse data formats support. Intelligent handling of various payloads with different types of responses and sizes

Standardization and transformation workflows. Processing various data into a single acceptable model with a unified structure that is compatible with Athena and downstream applications

Flexible and extendable vendor data integrations. Allow new vendors to be added anytime and have 0 downtime for them as soon as they are added. Create real real-time collection/processing system.

This work proposes a practical plan for future investigations and improvements both in general and specifically in a specified domain of science. Introducing scalable data ingestion for Earth system science and cyber-physical systems.

Presentation of The Main Research Material

To address challenges mentioned in the introduction of this article, namely: scalability, elasticity, flexibility, fault tolerance, data ingestion from diverse sources and formats, and also cost efficiency, the system is built in a very modular and loosely coupled cloud-native manner. It's not relying on monolithic, batch-oriented solutions nor on hardware dependencies of a static on-premise approach. It embraces isolation and hardware independence, being fully event-driven and fault-tolerant. This will open the opportunities for isolation of logic from different vendors by the layer of abstraction and result in high flexibility, parallelism, and automation.

The architecture consists of a few independent layers. Each of them serves as a solution to some task in the life cycle of data. Starting from planning, metadata preparation, and orchestration, or processing and data fetching requests [1]. This multi-layer model improves fault-tolerance, traceability, and enables easy integration of new data vendors and formats.

So there are 5 main layers. If necessary, the addition of extra layers is permitted. However, for the prototype of the systems, these layers are sufficient.

Scheduler Layer. As stated, it's used to schedule jobs. This schedule might depend on multiple factors, but initially it's set by configurable cron expressions or event-based triggers (coming from the database with all vendors). But scheduling can also happen due to job failure or unavailability of the server at some point in time (so-called retrials).

Orchestration Layer. This is the first place where the scheduled request comes. Coordination of request, validation, and circuit breaker logic of handling errors happens here.

Execution Layer. Executes specific vendor commands using modular Lambda functions (orchestrated by SQS queue). It's responsible for fetching data, processing, and storing it into general S3 storage.

Data Layer. Persists clean data in S3, then aligns it with the desired model by Athena and stores it again. Metadata is managed in a NoSQL database (MongoDB) separately [6].

Analytics layer. This layer is flexible, but mainly for exposing collected and structured datasets to machine learning pipelines (such as Sagemaker). Enabling efficient ad-hoc queries.

The core part of this architecture lies in the fact that those layers don't intersect with each other [4]. Allowing further improvement, redesign, or domain or requirements change of the system [5].

Vendor Abstraction Layer

Being able to communicate with a wide range of data sources with unique data formats, API specifications, rate and speed limits, and authentication mechanisms is a crucial part of the system with such obligations. The vendor abstraction layer was designed to address those challenges, but also avoid tight coupling and introduce additional complexity. This layer isolates vendor-specific logic that allows for extending the system without any downtime or additional challenges [7].

Each vendor is a dynamic module that relies on abstraction. Its abilities are defined by metadata, stored in MongoDB. Those configurations include (but are ot limited to): API endpoints, request rate limits, retrial state and policies, secret name references for authentication, expected data formats, scheduling, pagination, API specific information for the desired data response [8].

At runtime, those parameters are interpreted by the system to define which data to fetch, how often, retrial policies, and so on. Implementation of this layer uses the Command pattern. Each operation receives data like a data object, which encapsulates the logic of communication with the server, data processing, and storage. Mostly, vendors consist of a collector – here lies everything related to getting data, paginating, and retrying. The repository component is responsible for parsing, transforming, compressing data, and writing it to appropriate S3 buckets in specified format and size batches.

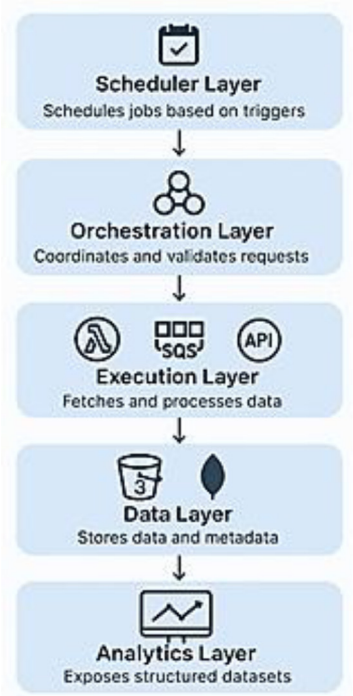


Fig. 1. Architecture layers

Parallel Execution and Observability

One of the advantages of the proposed architecture is independent command execution from the vendor. Each of them is being processed by different AWS Lambda functions. Those commands are coming in parallel using Amazon SQS. This construction allows for building an independent and scalable operating part that adapts to different spikes in workload. Basically, it removes the bottleneck from the whole fetching process.

It increases productivity, as well as traceability. We can use each message and identify which of them failed and why. Also, retrying them is always an option. Each command can be tested independently and in isolation from other parts of the system, which makes it more robust and easier to maintain in terms of testing. Also, security benefits from it as each execution is bound to a specific vendor and its related credentials and can't change any other data.

Error Handling, Retries, and Resilience Mechanisms

So, to adapt to different issues with data fetching, a variety of methods are provided in the system. Starting from default error handling and logging to the DLQ (dead letter queue – re-triggers failed SQS messages), circuit breaker (to handle exceeding rate limitations and server downtime) and others.

Each vendor endpoint is actively monitored by its recent behavior. If there are a few repetitive errors or time-outs, malformed payloads or throttling responses, system transitions failing vendor (or its part) to the Opened state. This means that all requests to this route will be stopped. That will protect both our system and vendor, not allowing them to overload with a vast amount of retry requests or corrupted data. After the predefined cooldown period goes by, the system transitions this vendor to the Half-open state. Which means that now it will try to make a couple of requests to verify that the server is responding correctly. If that's the case, the circuit breaker will switch to Closed. And it's the default state for the system. This indicates that all components are functioning optimally, allowing the system to utilize the server's full capacity.

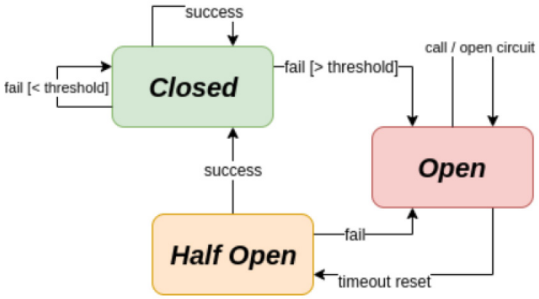


Fig. 2. Circuit breaker process

Additionally, the application is designed to adhere to a retry policy that is entirely independent of the circuit breaker itself. We got retries on the request level as well as the orchestration level. They both use an exponential backoff pattern. Those methods allow the system to handle all failure points. Both server-side and user-side failures are like human mistakes, while setting up the system (with invalid timeout or credentials). Allowing fine-grained control on the number of retries, which should be attempted before we escalate errors to handle them by manual resolution (with logs or notifications). But most of the time, given that vendors work correctly, the system utilizes self-recovery in the face of partial failure or degraded conditions [9].

Experimental Evaluation

To validate the efficiency and adaptability of the proposed architecture, we will create the system and simulate a representative use case. We will be measuring the most relevant metrics for this challenge [10, 11]. We are going to collect data from a list of global providers' heterogeneous datasets to analyze the process of their collection, processing, transforming, and storing. These sources cover various domains and data types. Our database includes simple JSON files as well as atmospheric conditions and satellite images. The selected data sources forthe prototype system are:

NASA GES DISC: providing datasets available via REST and FTP technologies in NetCDF and CSV formats

ESA Copernicus Open Access Hub. Offers satellite data in GeoJSON format

OpenAQ. JSON based public API for real-time air quality

Simulated Retail Data Vendor. E-commerce reporting API with JSON data, rate-limits and token-based access.

Each vendor is integrated as a separate dynamic module using metadata stored in MongoDB. Their logic is based on abstraction, so we can easily switch those resources if needed (as long as they contain abstraction that we already manage (types, formats). After the initial test run, distinct collection jobs were executed automatically, triggered by scheduled retry-based events. During the test run system experienced some rate limitations and errors, but handled it well, sustaining an average concurrency of 15–20 Lambda functions.

Data was successfully fetched in batches if that was possible. Then normalized to a JSON general structure. Then it was compressed and stored in S3. Metadata for the corresponding fetch updated the MongoDB database. For most of the data, we received transformed structured analytics using Amazon Athena, and it would be ready to be sent to Sagemaker for further processing.

Productivity of the system was evaluated by the few metrics. Here are results that represent average values during the experimental run.

Cold starts of the system were only observed when no activity was present for last moments before it, due to backoffs or just free time between scheduled tasks [12]. And lasted less than half a second. So the more system is loaded the better in terms of having less cold start time. Most of the tasks are taking only couple of seconds, but it depends on provider. This is good approach, to have small data batches and can be achieved by using pagination for most cases.

Table 1

System metrics evaluation

Metric	Proposed Serverless System
Throughput	~4.3 MB/sec (aggregated)
Cold Start Time	~280 ms (Lambda, Node.js)
Execution Duration	~2.1 seconds (average job)
API Error Rate	0.9 % (mostly 429/503 errors)
Retries (successful)	97 % recovery within 2 tries
S3 Compression Efficiency	~78 % (GZIP, structured JSON)
Cost per 1000 Jobs	~$0.84 (all-inclusive)

Fault tolerance was highly effective as well. Most of API errors were caused by throttling and processed well with retrials and time. Circuit breaker mechanism also prevented cascading failures by pausing access to unavailable endpoints.

Archieved data appeared to be effective and took less space than JSON raw data by 78 %. Hovewer, not all data can be shrunk by that volume, it depends on specific data types.

At last, cost profile appeared to be as expected, but also can be reduces if scale of the system goes up. Most expences were caused by usage on Lambda functions and S3 load.

For a better understanding of system effectiveness and the real advantages of it, the system will be compared with common alternatives, which are commonly used in data integration systems and their automation.

Monolithic ETL systems (e.g, Airflow on EC2): tightly coupled, synchronous, often requiring static resource provisioning

Batch-oriented EC2 jobs. They are more elastic, but require a lot of effort to set them in a fault-tolerant way. They are also less agile.

Manual ingestion workflows. Most widely used legacy solution. Based on scripts, cron jobs, and CLI tools. Non-cloud solution.

Table 2

Solutions comparison

Metric	Serverless (Ours)	Monolithic ETL	EC2 Batch Jobs	Manual Ingestion
Scalability	High	Low–Medium	Medium	Low
Latency (Avg. Job)	2.1 sec	5–12 sec	8–15 sec	Min–Hours
Fault Isolation	Strong	Weak	Moderate	None
Ops Overhead	Very Low	High	High	Very High
Cost (per 1000 jobs)	$0.84	$3.10	$2.75	N/A
Cold Start Risk	Moderate	N/A	Low	N/A
Retry/Recovery	Fully automated	Partial/manual	Manual	Manual

As we see from the comparison table, the serverless model is clearly having advantages in terms of resilience, elasticity, and cost-efficiency. Monolithic ETL tools allow having powerful orchestration features, but require manual error handling and recovery [13]. Also addition of new vendors and data types requires centralized configuration and a system restart. EC2 solutions allow horizontal scaling, but resource management and error-handling, and vendor isolation remain a challenge.

At the end of the day, proposed system not only winning in most of the metrics, it also is modern-cloud oriented solution. It's fairly easy to migrate to it and also it rapidly evolves. It embrases decoupling, automation and granular observability. And those plays a big role for sustainability of large system with vast amount of data [14].

Limitations and Future Directions

While the proposed system performs well and offers great conditions for collecting, processing, and storing data in various cases and complexities, a few areas are still widely open for improvements and research. First of all, there are several topics to consider, including handling greater scale, managing larger workloads (such as substantial data processing required in the initial fetch phase), streaming data, intelligent semantic alignment, and more. Furthermore, adapting the system to achieve the desired result is essential, as modifications are encouraged in the event of specific circumstances at any point in the data pipeline.

One of the primary restrictions in the cloud is the reliance on batch-based data ingestion. Although the system has performed adequately in retrieving data at scheduled intervals, it does exhibit delays when processing data streams, event-driven data, or real-time sensor streams. Future development should be focused on the integration of AWS Kinesis data streams along with AWS MSK (Managed Kafka). This can be implemented as an optional add-on to the core architecture, provided that the aforementioned needs are met. These will help support stream-based architecture while preserving modular structure. However, implementing this change would necessitate not only architectural enhancements but also structural modifications to the codebase. One area that could benefit from attention is the enhancement of collector and repository logic to operate on event- or data-driven foundations and respond to incoming batches [15].

Another key challenge is the normalization of the scheme between the system and a vendor. Presently, the predominant data format is JSON, as it is the most widely used data format for non-strict schemes. However, it does not resolve semantic differences in field names, units, or structures for equivalent concepts. Addressing this may involve integrating AI and providing training. Automation has the potential to introduce complexity, but it also ensures the system's resilience to conversion of inches to centimeters during flight operations demonstrates this capability [16].

The proposed architecture is well-positioned to support machine-learning processes. This pertains to individuals involved in Sagemaker-related projects. The article addresses this topic briefly; nevertheless, it is a crucial element, as it determines the system's primary function. However, the data is already structured and prepared to go into Sagemaker models. Therefore, as a future improvement, it is advisable to implement an automated machine learning process as part of the data pipeline. This will finalize the cycle between data acquisition and its direct outcome, which will be analyzed data, results, or trained models [17].

Lastly, for most advanced use cases, when data volumes reach the petabyte scale, there can be natural limitations by the services such as Athena and S3. It will occur due to query latency and partition depth. It can be prevented by future integrations with Lakehouse (AWS Iceberg), which can combine the flexibility of cloud storage with the consistency of relational stores.

Those directions point out weak places in the solution. Even though they are specific, and proposed system can handle most of the needs. This brings us to a broader vision, where modular architecture not only supports fetching, fault-tolerance, processing, storing, and analyzing data, but also the full data lifecycle of scientific insight.

Summary and Conclusion

This paper presents a novel, modular, and serverless system architecture for efficient and scalable data collection, transformation, and processing, with a particular focus on climate and environmental datasets. The proposed architecture effectively addresses the critical challenges faced by traditional ETL systems, such as limited scalability, fault tolerance, and high operational overhead.

Through the integration of AWS cloud services, inluding Lambda, S3, EventBridge, SQS, and Athena, the system achieves elasticity, high throughput, automated error recovery, and cost-efficiency. Experimental evaluation demonstrates that the serverless model outperforms monolithic and batch-based alternatives in terms of latency, scalability, reliability, and operational simplicity. The system's vendor abstraction layer further enhances flexibility, allowing seamless integration of heterogeneous data providers with minimal manual intervention.

The inclusion of parallel processing, circuit breaker logic, and fine-grained retry mechanisms significantly increases fault tolerance and enables real-time adaptability to diverse vendor constraints and API behaviors. Additionally, the modular design allows the architecture to evolve and scale as new requirements or data sources emerge.

Despite its strengths, the current implementation faces limitations in handling real-time streaming data and semantic heterogeneity in data formats. Future research directions include the incorporation of streaming services like AWS Kinesis and Kafka, the automation of schema normalization using AI techniques, and the integration of machine learning pipelines for intelligent data analysis.

In conclusion, this research offers a practical and forward-looking solution for scientific and industrial domains that demand flexible, fault-tolerant, and efficient data ingestion infrastructures. The proposed system lays the foundation for a comprehensive, cloud-native platform capable of supporting the full lifecycle of data-driven insight.

Bibliography

1. Балдіні, Іоана та ін. «Безсерверні обчислення: сучасні тенденції та відкриті проблеми». Досягнення досліджень у хмарних обчисленнях (2017): 1–20. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5026-8_1

2. Спіллнер, Йозеф та ін. «FaaSdom: набір еталонів для безсерверних обчислень». Міжнародна конференція IEEE/ACM з комунальних послуг та хмарних обчислень (UCC) 2019 року. IEEE, 2019. https://doi.org/10.1109/UCC48980.2019.00015

3. Йонас, Ерік та ін. «Спрощене хмарне програмування: погляд Берклі на безсерверні обчислення». Препринт arXiv arXiv:1902.03383 (2019). https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.03383

4. Ван, Лей та ін. «Зазирнувши за лаштунки безсерверних платформ». Матеріали щорічної технічної конференції USENIX 2018 року (USENIX ATC 18). 2018. https://doi.org/10.5555/3291168.3291184

5. Ройтер, Крістіан та ін. «Підхід на основі шаблонів до стійкості до помилок API для хмарних систем». Матеріали Міжнародної конференції IEEE з хмарної інженерії (IC2E) 2020 року. IEEE, 2020. https://doi.org/10.1109/IC2E48795.2020.00011

6. Ван Ейк, Елко та ін. «Еталонна архітектура SPEC-RG для FaaS: від мікросервісів та контейнерів до безсерверних платформ». IEEE Internet Computing, т. 23, № 6, 2019, с. 7–18. https://doi.org/10.1109/MIC.2019.2952061

7. Річардсон, Кріс. Шаблони мікросервісів: з прикладами на Java. Manning Publications, 2018. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5574-3_3

8. Медель, Віктор та ін. «Підтримка проміжного програмного забезпечення для контекстно-залежних застосунків з компонентами повторного використання». Journal of Systems and Software 134 (2017): 181–197. https://doi.org/10.1016/j.jss.2017.08.009

9. Резенде, Педро та ін. «Відмовостійка архітектура для API на основі REST». Future Generation Computer Systems 108 (2020): 422–435. https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.005

10. Спіллнер, Йорг та Мірко Вестерхайде «Безсерверна обробка даних за допомогою AWS Lambda та Apache Spark». Journal of Cloud Computing, т. 9, № 1, 2020, с. 1–14. https://doi.org/10.1186/s13677-020-00172-0

11. Балдіні, Іоана та ін. «Безсерверні обчислення: сучасні тенденції та відкриті проблеми». Research Advances in Cloud Computing, під редакцією Раджкумара Буйї та ін., Springer, 2017, с. 1–20. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5026-8_2

12. Ранівала, Хемант та ін. «Розробка економічно ефективних та масштабованих безсерверних застосунків». Міжнародна конференція IEEE з хмарної інженерії (IC2E) 2021 року, 2021, с. 95–102. https://doi.org/10.1109/IC2E52221.2021.00028.

13. Лю, Ян та ін. «Розуміння безсерверних обчислень: погляд з розподілених систем». ACM SIGOPS Operating Systems Review, т. 53, № 1, 2020, с. 35–41.

14. Ішакян, Ватче, Вінод Мутхусамі та Александер Сломінський. «Обслуговування моделей глибокого навчання на безсерверній платформі». Міжнародна конференція IEEE з хмарної інженерії (IC2E) 2018 р., 2018, с. 257–262. https://doi.org/10.1109/IC2E.2018.00039

15. Гулісано, Вінченцо та ін. «StreamCloud: еластична та масштабована система потокової передачі даних». IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, т. 23, № 12, 2012, с. 2351–2365. https://doi.org/10.1109/TPDS.2012.21

16. Тірумуруганатан, Суділа Рой та ін. «Курування даних за допомогою глибокого навчання: опитування». Праці фонду VLDB, т. 14, № 12, 2021, с. 3190–3202. https://doi.org/10.14778/3476311.3476381

17. Анантхакрішна, Рамеш та ін. «Усунення нечітких дублікатів у сховищах даних». Матеріали 28-ї Міжнародної конференції з дуже великих баз даних (VLDB), 2002, с. 586–597. https://doi.org/10.14778/645806.669434.

References

1. Baldini, Ioana, et al. “Serverless computing: Current trends and open problems”. Research Advances in Cloud Computing (2017): 1–20. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5026-8_1

2. Spillner, Josef, et al. “FaaSdom: A benchmark suite for serverless computing”. 2019 IEEE/ACM International Conference on Utility and Cloud Computing (UCC). IEEE, 2019. https://doi.org/10.1109/UCC48980.2019.00015

3. Jonas, Eric, et al. “Cloud programming simplified: A Berkeley view on serverless computing”. arXiv preprint arXiv:1902.03383 (2019). https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.03383

4. Wang, Lei, et al. “Peeking behind the curtains of serverless platforms”. Proceedings of the 2018 USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC 18). 2018. https://doi.org/10.5555/3291168.3291184

5. Reuter, Christian, et al. “A pattern-based approach to API error resilience for cloud-native systems”. Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E). IEEE, 2020. https://doi.org/10.1109/IC2E48795.2020.00011

6. Van Eyk, Eelco, et al. “The SPEC-RG Reference Architecture for FaaS: From Microservices and Containers to Serverless Platforms”. IEEE Internet Computing, vol. 23, no. 6, 2019, pp. 7–18. https://doi.org/10.1109/MIC.2019.2952061

7. Richardson, Chris. Microservices Patterns: With examples in Java. Manning Publications, 2018. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5574-3_3

8. Medel, Víctor, et al. “Middleware support for context-aware applications with reusable components”. Journal of Systems and Software 134 (2017): 181–197. https://doi.org/10.1016/j.jss.2017.08.009

9. Resende, Pedro, et al. “A fault-tolerant architecture for REST-based APIs”. Future Generation Computer Systems 108 (2020): 422–435. https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.005

10. Spillner, Jörg, and Mirko Westerheide “Serverless Data Processing with AWS Lambda and Apache Spark”. Journal of Cloud Computing, vol. 9, no. 1, 2020, pp. 1–14. https://doi.org/10.1186/s13677-020-00172-0

11. Baldini, Ioana, et al. “Serverless Computing: Current Trends and Open Problems”. Research Advances in Cloud Computing, edited by Rajkumar Buyya et al., Springer, 2017, pp. 1–20. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5026-8_2

12. Raniwala, Hemant, et al. “Design of Cost-Efficient and Scalable Serverless Applications”. 2021 IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E), 2021, pp. 95–102. https://doi.org/10.1109/IC2E52221.2021.00028

13. Liu, Yang, et al. “Understanding Serverless Computing: A View from Distributed Systems”. ACM SIGOPS Operating Systems Review, vol. 53, no. 1, 2020, pp. 35–41.

14. Ishakian, Vatche, Vinod Muthusamy, and Aleksander Slominski. “Serving Deep Learning Models in a Serverless Platform”. 2018 IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E), 2018, pp. 257–262. https://doi.org/10.1109/IC2E.2018.00039

15. Gulisano, Vincenzo, et al. “StreamCloud: An elastic and scalable data streaming system”. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 23, no. 12, 2012, pp. 2351–2365. https://doi.org/10.1109/TPDS.2012.21

16. Thirumuruganathan, Sudeepa Roy, et al. “Data curation with Deep Learning: A Survey”. Proceedings of the VLDB Endowment, vol. 14, no. 12, 2021, pp. 3190–3202. https://doi.org/10.14778/3476311.3476381

17. Ananthakrishna, Ramesh, et al. “Eliminating fuzzy duplicates in data warehouses”. Proceedings of the 28th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB), 2002, pp. 586–597. https://doi.org/10.14778/645806.669434

УДК 004.8 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.16

Р. А. ДИДО
студент кафедри комп'ютерних наук
Хмельницький національний університет
ORCID: 0009-0005-4377-7607

В. О. ДІДУР
студент кафедри комп'ютерних наук
Хмельницький національний університет
ORCID: 0009-0008-2279-1487

Р. О. БАГРІЙ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерних наук
Хмельницький національний університет
ORCID: 0000-0001-5219-1185

О. В. МАЗУРЕЦЬ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерних наук
Хмельницький національний університет
ORCID: 0000-0002-8900-0650

ПРОЄКТУВАННЯ ВЕБСИСТЕМИ З БАЗОЮ ДАНИХ ДЛЯ ОНЛАЙН-БРОНЮВАННЯ НОМЕРІВ У ГОТЕЛІ НА ОСНОВІ АРХІТЕКТУРИ MVC

У статті представлено підхід до проєктування та розробки вебсистеми з базою даних для онлайн-бронювання номерів у готелі на основі архітектури MVC. Проаналізовано існуючі рішення в галузі онлайн-бронювання готелів, який вказує на те, що попри наявність численних систем, поширеними проблемами залишаються складність інтеграції з платіжними сервісами та зовнішніми API, недостатній рівень персоналізації, а також оптимізація продуктивності під час високого навантаження. Тому метою роботи було створення ефективної, зручної у використанні та безпечної вебсистеми з базою даних для онлайн-бронювання номерів у готелі на основі архітектури MVC, яка автоматизує процес бронювання готельних номерів і спрощує керування клієнтськими даними.

Для реалізації користувацького інтерфейсу було використано бібліотеку React, що забезпечує динамічне та адаптивне відображення інформації, полегшуючи взаємодію користувачів із системою. Серверна частина побудована на платформі Node.js із використанням фреймворку Express, що дозволяє організувати маршрутизацію запитів, обробку бізнес-логіки та безпечну авторизацію користувачів. Для зберігання даних застосована система керування базами даних MySQL, яка відповідає за цілісність, швидкість доступу та структуроване збереження інформації про користувачів, бронювання, номери та їх статуси.

Розроблена вебсистема з базою даних для онлайн-бронювання номерів у готелі враховує основні функціональні вимоги сучасних онлайн-сервісів бронювання: реєстрацію користувачів, керування бронюваннями, перегляд доступних номерів та керування персональними кабінетами. Використаний архітектурний підхід MVC забезпечує розділення логіки, представлення та роботи з даними, що полегшує подальшу підтримку, розширення функціональності і масштабування системи.

Запропонована система має потенціал для подальшого розвитку, зокрема за впровадження алгоритмів для персоналізованих рекомендацій, розширення можливостей оплати та підвищення захисту даних.

Ключові слова: *вебсистема, готель, база даних, MVC, MySQL.*

R. A. DYDO
Bachelor Student at the Computer Science Department
Khmelnytskyi National University
ORCID: 0009-0005-4377-7607

V. O. DIDUR
Bachelor Student at the Computer Science Department
Khmelnytskyi National University
ORCID: 0009-0008-2279-1487

R. O. BAHRII
Ph.D. in Engineering Science,
Associate Professor at the Computer Science Department
Khmelnytskyi National University
ORCID: 0000-0001-5219-1185

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

DESIGN OF WEB SYSTEM WITH DATABASE FOR ONLINE HOTEL ROOM BOOKING BASED ON MVC ARCHITECTURE

The article presents an approach to the design and development of a web system with a database for online hotel booking based on the MVC architecture. Existing solutions in the field of online hotel booking are analyzed, which indicates that despite the presence of numerous systems, common problems remain the complexity of integration with payment services and external APIs, insufficient level of personalization, as well as optimization of performance during high load. Therefore, the aim of the work was to create an effective, user-friendly and secure web system with a database for online hotel booking based on the MVC architecture, which automates the hotel booking process and simplifies customer data management.

To implement the user interface, the React library was used, which provides dynamic and adaptive display of information, facilitating user interaction with the system. The server part is built on the Node.js platform using the Express framework, which allows you to organize request routing, business logic processing and secure user authorization. The MySQL database management system is used to store data, which is responsible for the integrity, speed of access and structured storage of information about users, reservations, rooms and their statuses.

The developed web system with a database for online hotel room booking takes into account the main functional requirements of modern online booking services: user registration, booking management, viewing available rooms and managing personal accounts. The MVC architectural approach used ensures the separation of logic, presentation and data work, which facilitates further support, expansion of functionality and scaling of the system.

The proposed system has the potential for further development, in particular for the implementation of algorithms for personalized recommendations, expanding payment options and increasing data protection.

Key words: *web system, hotel, database, MVC, MySQL.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах цифрової трансформації готельного бізнесу особливу роль відіграють вебсистеми, що забезпечують автоматизацію процесів пошуку, бронювання та адміністрування готельних номерів [1]. Із зростанням попиту на дистанційні сервіси в туристичній галузі критично важливими стають швидкість обробки запитів, масштабованість рішень, зручність для кінцевого користувача та безпека збереження персональних даних [2]. Водночас на практиці існуючі платформи часто мають обмежену модульність, недостатньо гнучку архітектуру або складну для супроводу структуру, що ускладнює адаптацію до змінних умов ринку та впровадження нових функцій.

Особливої уваги потребує розробка програмної архітектури вебсистеми, яка дозволить забезпечити відокремлення бізнес-логіки від представлення та взаємодії з базою даних [3, 4]. У цьому контексті модель Model-View-Controller (MVC) стає доцільним архітектурним рішенням, яке сприяє покращенню структури коду, підвищенню масштабованості, полегшенню тестування та супроводу системи [5]. Проте застосування цієї архітектури до задач онлайн-бронювання вимагає адаптації до специфіки предметної області: динамічного оновлення інформації про наявність номерів, гнучких механізмів пошуку, забезпечення багаторівневої автентифікації та ролей користувачів.

Таким чином, виникає проблема розробки вебсистеми для онлайн-бронювання номерів у готелі, побудованої за архітектурною моделлю MVC, яка поєднує структурну чіткість, ефективну взаємодію з базою даних та зручність у використанні для різних категорій користувачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні виділено окремий напрямок наукових робіт, у яких висвітлюється розробка вебсистем для онлайн-бронювання номерів у готелі. У цих статтях детально розглядаються підходи до архітектури, вибору технологій та реалізації функціональних можливостей, що сприяють автоматизації процесів бронювання та покращенню користувацького досвіду, тому далі наведено деякі з них.

У статті [6] представлено розробку системи керування онлайн-бронюванням номерів на основі архітектури MVC з використанням фреймворку Laravel. Система автоматизує процес бронювання, забезпечує рольовий доступ (гостя, адміністратора, менеджера), має зручний інтерфейс і захищену автентифікацію з хешуванням

паролів і CSRF-захистом. Для збереження даних застосовано MySQL з індексацією та кешуванням. Ключовим функціональним модулем є динамічний планувальник, що відображає наявні номери в реальному часі, запобігаючи дублюванню бронювань. Система захищена від типових вебзагроз (SQL-ін'єкцій, некоректного вводу) і передбачає подальше розширення, зокрема інтеграцію ШІ та зовнішніх API.

У статті [7] висвітлено результати розробки онлайн-системи бронювання номерів для готелю Silverline Guest Lodge, яка замінює існуючу ручну систему. Для збору вимог було проведено опитування безпосередньо в готелі в місті Лусака. У розробці застосовано інструменти: текстовий редактор Notepad++, мову програмування PHP, базу даних MySQL, а також API для інтеграції платіжної системи Stripe і функцій відправки листів через PHP Mailer.

У статті [8] авторами запропоновано ситему для управління бронюванням готелів та житла застосовано монолітну архітектуру з використанням шаблонів MVC та клієнт-сервер. Серверна частина реалізована мовою PHP на основі фреймворку Symfony, а клієнтська – із застосуванням бібліотеки React на JavaScript. Для зберігання даних використовується MySQL як основна база та MongoDB як додаткова.

Огляд існуючих наукових досліджень у сфері розробки вебсистем для онлайн-бронювання готелів показує активне застосування сучасних архітектурних підходів, зокрема MVC і клієнт-серверної моделі, а також використання популярних технологій, таких як PHP, Laravel, Symfony, React і різноманітних СКБД (MySQL, MongoDB) [9, 10]. У проаналізованих роботах приділяється увага автоматизації процесів бронювання, підвищенню зручності користувачів за допомогою інтуїтивних інтерфейсів, а також питанням безпеки даних і масштабованості систем. Водночас дослідження вказують на низку проблем, які залишаються актуальними: складність інтеграції різнорідних сервісів (платіжних систем, зовнішніх API), недостатній рівень персоналізації сервісів для користувачів, а також проблеми з оптимізацією продуктивності під час зростання навантаження.

Таким чином, незважаючи на помітний прогрес у розробці вебсистем бронювання, існує потреба в подальшому удосконаленні архітектурних рішень, розробці більш адаптивних і безпечних механізмів автентифікації.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є проєктування та розробка вебсистеми з базою даних для онлайн-бронювання номерів готелі на основі архітектури MVC, що дозволить автоматизувати основні процеси бронювання, спростити керування даними про клієнтів і номери, а також забезпечити зручний інтерфейс для користувачів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Одним із перших етапів у розробці вебсистеми для онлайн-бронювання готелів є проєктування бази даних [11], що забезпечує ефективне зберігання та структурування інформації про клієнтів, номери та бронювання. На основі спроєктованої бази даних реалізується архітектура MVC, яка дозволяє розділити логіку додатку, інтерфейс користувача та роботу з даними, що сприяє зручності розробки, підтримки та масштабування системи [12, 13]. Згідно проведеного аналізу предметної області було спроєктовано даталогічну модель бази даних, що подана на рисунку 1.

Однією з основних є таблиця Room_Bookings, яка фіксує факт здійснення бронювання клієнтом певного номера. Вона містить усю необхідну інформацію щодо дати початку, завершення, вартості та моменту створення бронювання. Взаємозв'язки реалізовано через зовнішні ключі до таблиць Clients та Hotel_Rooms. Таблиці users та clients, призначені для зберігання інформації про клієнтів, які здійснюють бронювання, та облікові записи користувачів.

Таблиця Hotel_Rooms містить основну інформацію про номери готелів, включаючи клас номера, поверх, місткість, ціну, а також посилання на готель, до якого він належить. Таблиця Services містить інформацію про додаткові послуги, які можна замовити під час бронювання, наприклад, сніданок або трансфер. Вона пов'язана з таблицею типів послуг через зовнішній ключ. Таблиця Booking_Details зберігає додаткову інформацію про кожне бронювання, яка не включена в основну таблицю Room_Bookings. Таблиця Employees містить дані про працівників, які можуть додавати деталі до бронювань, перевіряти статуси. Вона пов'язана з таблицею Clients, що дозволяє використовувати існуючу інформацію про людину. Таблиця Payments зберігає інформацію про здійснені оплати, пов'язані з конкретними бронюваннями. Вона фіксує тип оплати, дату, час та суму. Room_Class зберігає інформацію про типи номерів, наприклад, «люкс», «стандарт», «апартаменти». Також тут вказано вартість і опис для кожного класу. А Room_Statuses дозволяє відслідковувати статус номерів: чи доступний він, перебуває на ремонті, очищується тощо. Вона також містить інформацію про причини зміни статусу.

Вебсистема з базою даних для онлайн-бронювання готелів на основі архітектури MVC була розроблена за допомогою React для створення користувацького інтерфейсу, Node.js з Express для реалізації серверної логіки та маршрутизації, а також MySQL [14] як системи керування базою даних для зберігання інформації про користувачів, бронювання та номери [15]. Сторінку бронювання номерів подано на рисунку 2.

Згідно з спроєктованою даталогічно базою даних, застосовуючи шаблон проєктування MVC, для опису архітектури системи й пояснення логіки її роботи сформовано схему взаємозв'язків між контролерами та моделями (рисунок 3).

З рисунку 3 видно, що вебсистема містить ряд контролерів, наприклад, AuthController, ClientController, HotelController, RoomController, BookingController, PaymentController, ServiceController та LocationController.

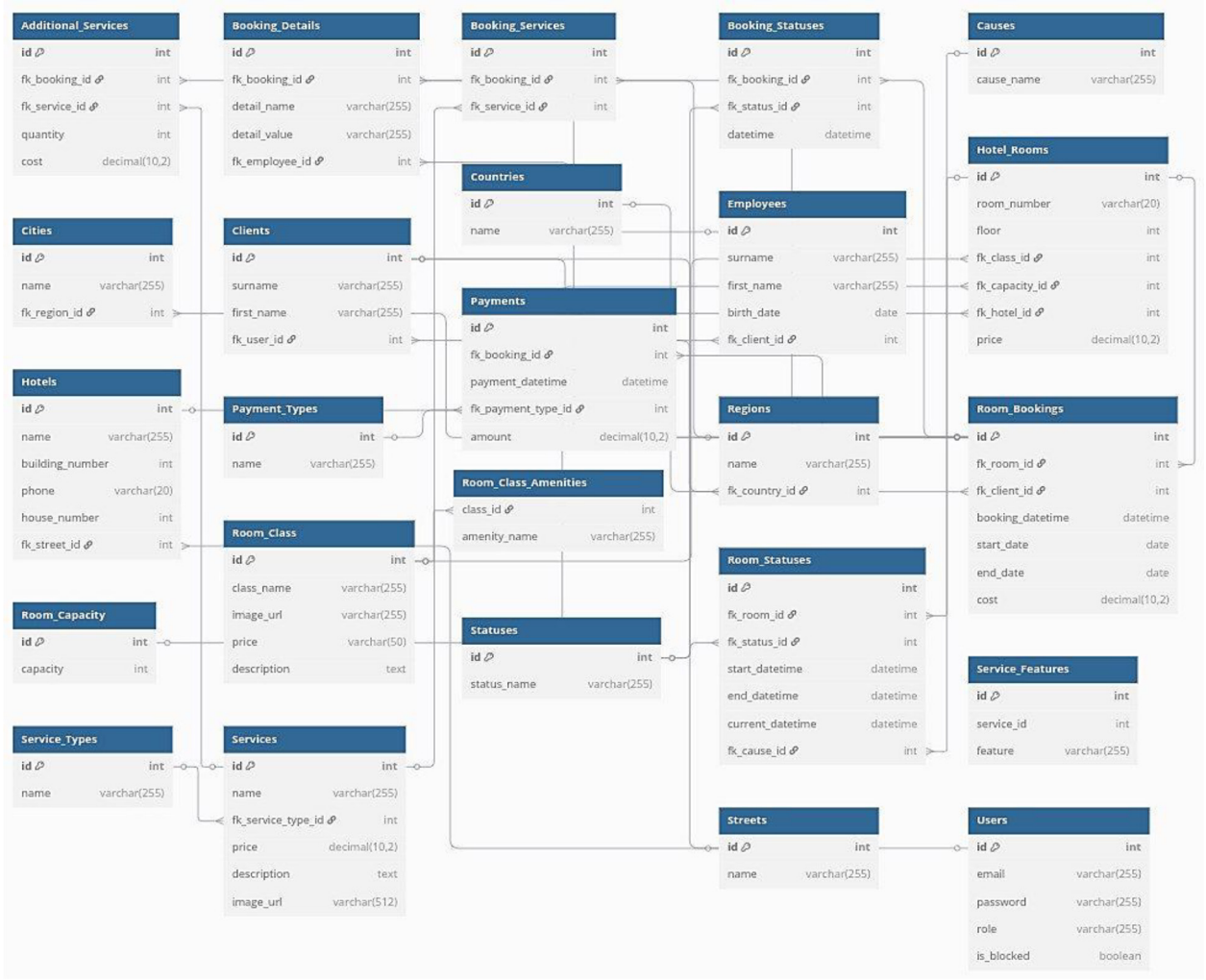


Рис. 1. Спроєктована даталогічна модель бази даних вебсистеми для онлайн-бронювання готелів

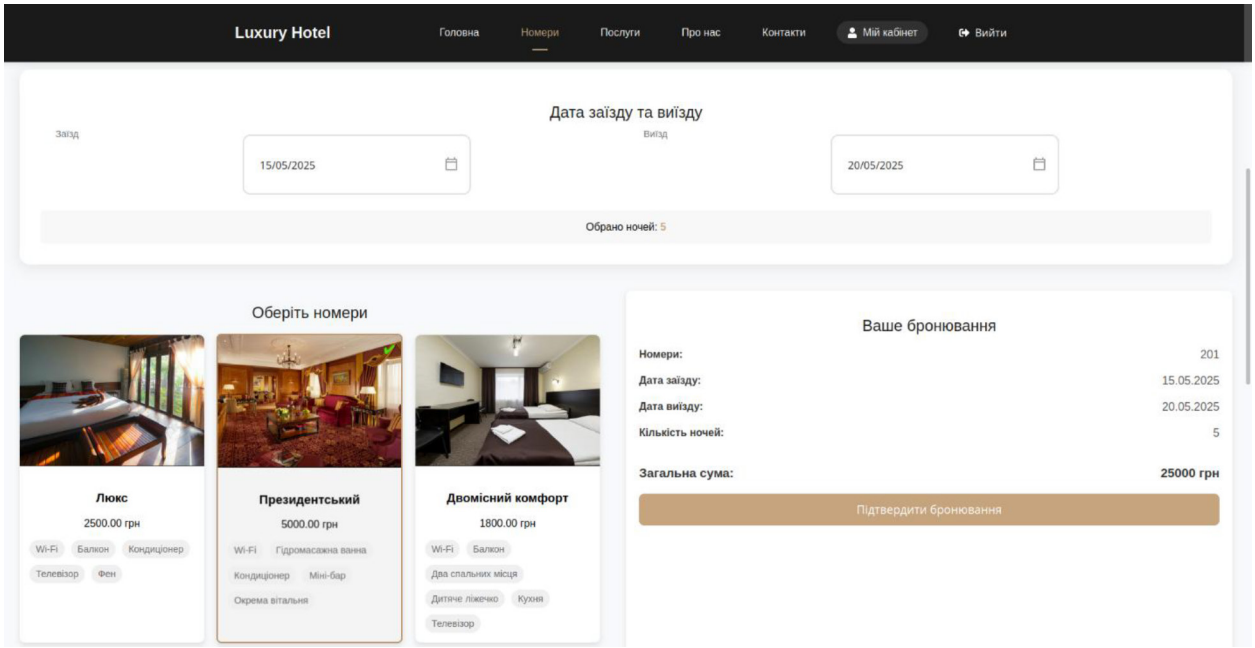


Рис. 2. Сторінка вебсистеми для бронювання номеру в готелі з використанням архітектури MVC

Кожен з контролерів виконує чітко визначені функції, безпосередньо взаємодіючи з відповідними моделями. Наприклад, AuthController обробляє авторизацію та реєстрацію користувачів, взаємодіючи з моделлю Users, тоді як ClientController відповідає за створення, редагування та видалення клієнтів, також спираючись на цю модель. HotelController реалізує логіку отримання та оновлення інформації про готелі, а RoomController відповідає за обробку даних номерів, пов'язаних з класом, місткістю та статусом кімнат, тобто працює з моделями Hotel_ Rooms, Room_Class та Room_Statuses.

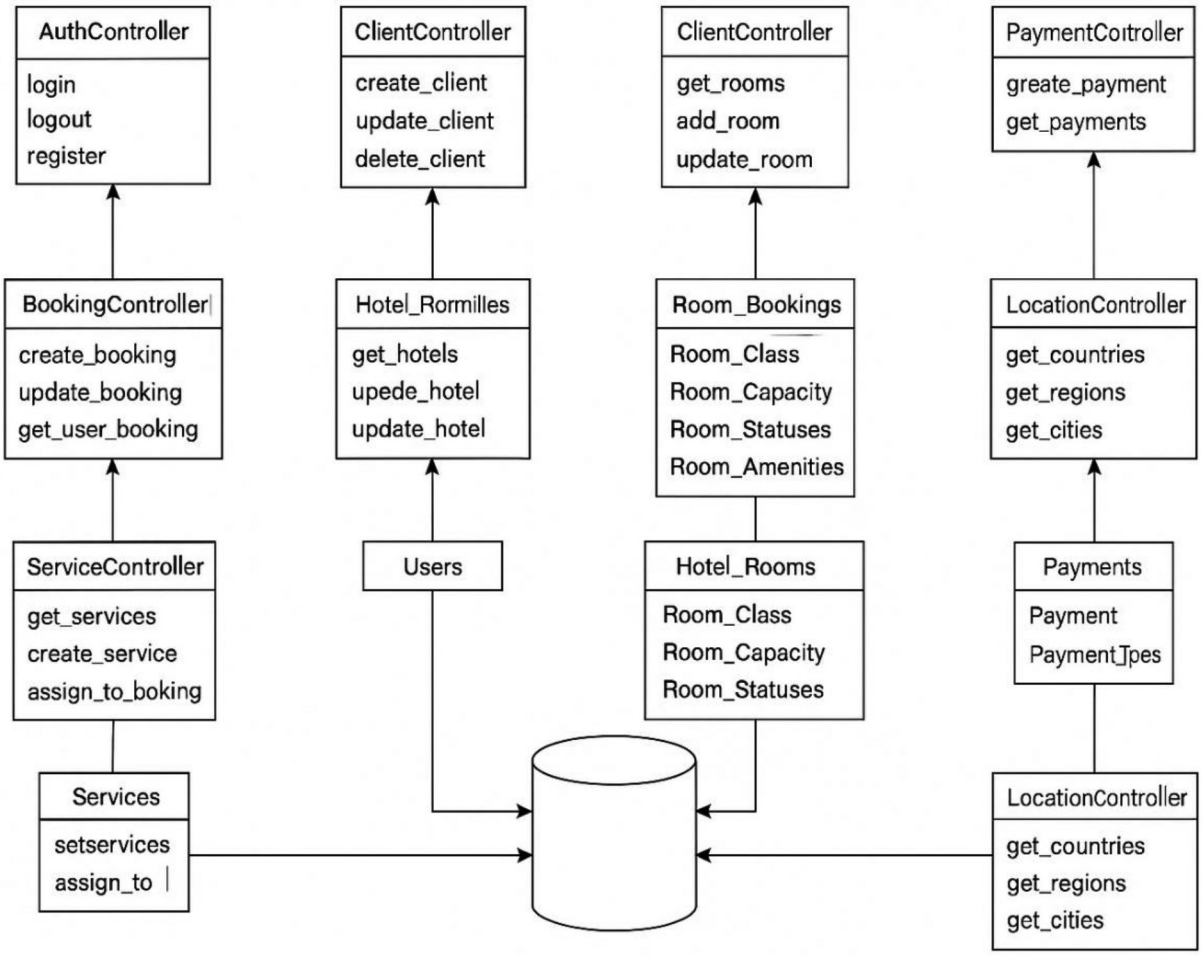


Рис. 3. Схема взаємозв'язку контролерів та моделей в архітектурі MVC вебсистеми для онлайн-бронювання в готелі

BookingController керує створенням, оновленням та отриманням інформації про бронювання номерів, взаємодіючи з Room_Bookings та пов'язаними моделями, включаючи Room_Amenities та Room_Statuses. ServiceController обробляє логіку, пов'язану з додатковими послугами, дозволяючи їх отримання, створення та призначення до конкретного бронювання, взаємодіючи з моделлю Services. Контролер LocationController забезпечує доступ до географічної інформації, такої як країни, регіони та міста, які зберігаються у відповідних таблицях бази даних, а PaymentController – до інформації про платежі та типи оплати, що представлені моделями Payments та Payment_Types.

Кожна з моделей репрезентує відповідну таблицю бази даних з рисунку 2, де визначені ключові атрибути та допоміжні функції для обробки пов'язаних записів. Всі моделі напряму звертаються до таблиць бази даних для витягування, запису, оновлення чи видалення даних. Двосторонні зв'язки у схемі демонструють можливість як отримання інформації, так і маніпуляцій з нею.

Таким чином, структура вебсистеми базується на чіткому розмежуванні обов'язків між контролерами та моделями, що забезпечує гнучкість, масштабованість і зручність підтримки програмного вебсистеми для онлайн-бронювання в готелі.

Висновки

Розглянуто ключові аспекти проєктування та розробки вебсистеми з базою даних для онлайн-бронювання номерів у готелі на основі архітектури MVC. Вибір саме такої архітектури обґрунтований її здатністю чітко

розділяти відповідальність між трьома основними компонентами – моделлю, видом та контролером, що забезпечує зручність у розробці, підтримці та масштабованості системи.

Проєктування бази даних як фундаментальної частини системи дозволило структурувати основні сутності: користувачів, номери, бронювання, статуси та встановити між ними необхідні зв'язки для коректної роботи вебсистеми.

Для реалізації користувацького інтерфейсу обрано React, що надало можливість створити динамічний, адаптивний та зручний у використанні фронтенд. Серверна частина, побудована на Node.js з Express, забезпечує ефективну обробку запитів, реалізацію бізнес-логіки, маршрутизацію і авторизацію, що є важливим для безпеки та стабільності роботи системи. Використання MySQL як системи керування бази даних гарантує надійне зберігання, цілісність та швидкий доступ до інформації.

Запропонований підхід до створення вебсистем для онлайн-бронювання номерів у готелях на основі архітектури MVC надає можливість створення засобу для автоматизації процесу онлайн-бронювання номерів, що сприяє підвищенню ефективності роботи готельних закладів та покращенню обслуговування клієнтів.

Список використаної літератури

1. Vernekar S. R., Kumar L., Kalnoor G. Hotel Reservation App Integrated with Docker and Jenkins. 2024 International Conference on Emerging Technologies in Computer Science for Interdisciplinary Applications (ICETCS), Bengaluru, India, 22–23 April 2024. 2024. URL: https://doi.org/10.1109/icetcs61022.2024.10544088 (дата звернення: 27.05.2025).

2. Understanding the Effects of Reservation Systems and Online Transaction Capacity on the Competitiveness of Travel Agencies / M. Işkın et al. European Journal of Tourism, Hospitality and Recreation. 2024. Vol. 14, no. 1. P. 55–70. URL: https://doi.org/10.2478/ejthr-2024-0004 (дата звернення: 27.05.2025).

3. Проєктування баз даних вебсистем: вебтехнологія використання вебфреймворку Django та системи керування базами даних MySql / Р. Багрій та ін. Наука і техніка сьогодні. 2025. № 4(45). URL: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4(45)-1083-1097 (дата звернення: 27.05.2025).

4. Datalogic Model for Determining the Clients Compatibility Based on Questionnaires Data Analysis by Artificial Intelligence Means / D. Zhuk et al. Innovative Solutions in Science: Balancing Theory and Practice. Proceedings of the 1st International scientific and practical conference. 2024. Pp. 80–85 (дата звернення: 27.05.2025).

5. Comparative Study: Performance of MVC Frameworks on RDBMS / M. H. Rahman et al. International Journal of Information Technology and Computer Science. 2024. Vol. 16, no. 1. P. 26–34. URL: https://doi.org/10.5815/ijitcs.2024.01.03 (дата звернення: 27.05.2025).

6. Patel K. A Comprehensive Booking Management System Using Laravel: B.Tech Thesis / K. Patel; advisor: M. Prajapati. Parul University, Vadodara, India, 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/389701325_A_Comprehensive_Booking_Management_System_Using_Laravel (дата звернення: 27.05.2025).

7. Nsama L., Neene N. Design and Development of an Online Room Reservation System for Silverline Guest Lodge / L. Nsama, N. Neene. The International Journal of Multi-Disciplinary Research. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/378867456_Design_and_Development_of_an_Online_Room_Reservation_System_for_Silverline_Guest_Lodge (дата звернення: 27.05.2025).

8. Kochura V., Loktikova T., Kushnir N. Hotel and accommodation booking management platform for travel in Ukraine. Modeling, Control and Information Technologies. 2024. No. 7. P. 125–127. URL: https://doi.org/10.31713/mcit.2024.034 (дата звернення: 27.05.2025).

9. Проєктування структури бази даних для інтелектуальної системи нейромережевого виявлення та локалізації на фотозображеннях ділянок із залишками зруйнованих будівель / О. Мазурець та ін. Наука і техніка сьогодні. 2025. № 4(45). URL: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4(45)-1242-1258 (дата звернення: 27.05.2025).

10. Реляційна даталогічна модель для прикладного аналізу репрезентативності навчальних тестів засобами обробки природної мови / О. Мазурець, О. Тищенко, Д. Гардиш. Наука і техніка сьогодні. 2025. № 13(41). URL: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13(41)-1129-1142 (date of access: 27.05.2025).

11. Datalogic Relation Model for Automated Evaluating the Semantic Integrity of Test Tasks Sets by Machine Learning Means / D. Hardysh et al. Innovative Solutions in Science: Balancing Theory and Practice. Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference. 2024. Pp. 114–125.

12. Даталогічна модель бази даних для виявлення гендерної приналежності за SVM-аналізом дописів інтернет-мереж з використанням об'єктно-орієнтованого проєктування / О. Мазурець та ін. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2024. Т. 337, № 3(2). С. 197–204. URL: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-29 (дата звернення: 27.05.2025).

13. Datalogic Projecting for Applied Adaptive Semantic Testing / O. V. Mazurets. Heritage of European Science. International collective monograph. Monographic series «European Science». Karlsruhe, Germany. 2024. Book 27. Part 3. Chapter 8. P. 147–156. ISBN 978-3-98924-038-4

14. Model for Image Recognition by Convolutional Neural Network Using Cloud Services / O. Mazurets et al. Proceedings of XXII International Scientific and Practical Conference “Modern Scientific Research: Theoretical and Practical Aspects”. 2024. Pp. 64–68.

15. Relation Datalogic Model for Determining the Diagnosis Based on Intellectual NLP-analysis of Symptom Description / O. Mazurets et al. Proceedings of XV International Scientific and Practical Conference “Innovative Development: Synthesis of Scientific Approaches in Various Fields of Research”. 2024. Pp. 61–66.

References

1. Vernekar S. R., Kumar L., Kalnoor G. (2024) Hotel reservation app integrated with Docker and Jenkins. Proceedings of the 2024 International Conference on Emerging Technologies in Computer Science for Interdisciplinary Applications (ICETCS) (India), IEEE. Retrieved from: https://doi.org/10.1109/icetcs61022.2024.10544088 (accessed 4 June 2025).

2. Işkın M., Prentice C., Eker N., Şengel Ü. (2024) Understanding the effects of reservation systems and online transaction capacity on the competitiveness of travel agencies. European Journal of Tourism, Hospitality and Recreation (electronic journal), vol. 14, no. 1, pp. 55–70. Retrieved from: https://doi.org/10.2478/ejthr-2024-0004 (accessed 4 June 2025).

3. Bahrii R., Mazurets O., Tyshchenko O., Sobko O., Hladun O. (2025) Proiektuvannia baz danykh vebsystem: vebtekhnolohiia vykorystannia vebfreimvorku Django ta systemy keruvannia bazamy danykh MySQL [Database design of web systems: web technology using the Django web framework and MySQL DBMS]. Nauka i tekhnika sohodni [Science and Technology Today] (electronic journal), no. 4(45). Retrieved from: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4(45)-1083-1097 (accessed 4 June 2025).

4. Zhuk D., Mazurets O., Sobko O., Klimenko V. (2024) Datalogic model for determining the clients compatibility based on questionnaires data analysis by artificial intelligence means. Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference “Innovative Solutions in Science: Balancing Theory and Practice”, Ukraine, pp. 80–85.

5. Rahman M. H., Naderuzzaman M., Kashem M. A., Salahuddin B. M., Mahmud Z. (2024) Comparative study: performance of MVC frameworks on RDBMS. International Journal of Information Technology and Computer Science (electronic journal), vol. 16, no. 1, pp. 26–34. Retrieved from: https://doi.org/10.5815/ijitcs.2024.01.03 (accessed 4 June 2025).

6. Patel K. (2025) A comprehensive booking management system using Laravel (B.Tech thesis, Parul University, Vadodara, India). Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/389701325_A_Comprehensive_Booking_Management_System_Using_Laravel (accessed 4 June 2025).

7. Nsama L., Neene N. (2021) Design and development of an online room reservation system for Silverline Guest Lodge. The International Journal of Multi-Disciplinary Research (electronic journal). Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/378867456_Design_and_Development_of_an_Online_Room_Reservation_System_for_Silverline_Guest_Lodge (accessed 4 June 2025).

8. Kochura V., Loktikova T., Kushnir N. (2024) Hotel and accommodation booking management platform for travel in Ukraine. Modeling, Control and Information Technologies (electronic journal), no. 7, pp. 125–127. Retrieved from: https://doi.org/10.31713/mcit.2024.034 (accessed 4 June 2025).

9. Mazurets O., Sobko O., Dydo R., Molchanova M., Tyshchenko O. (2025) Proiektuvannia struktury bazy danykh dlia intelektualnoi systemy neiromerezhevoho vyiavlennia ta lokalizatsii na fotozobrazhenniakh dialianok iz zalyshkamy zruinovanykh budivel [Database structure design for an intelligent system for neural network-based detection and localization of ruins in photos]. Nauka i tekhnika sohodni [Science and Technology Today] (electronic journal), no. 4(45). Retrieved from: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4(45)-1242-1258 (accessed 4 June 2025).

10. Mazurets O., Tyshchenko O., Hardysh D. (2025) Reliatsiina datalochna model dlia prykladnoho analizu reprezentatyvnosti navchalnykh testiv zasobamy obrobky pryrodnoi movy [Relational datalogic model for applied analysis of the representativeness of educational tests using natural language processing]. Nauka i tekhnika sohodni [Science and Technology Today] (electronic journal), no. 13(41). Retrieved from: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13(41)-1129-1142 (accessed 4 June 2025).

11. Hardysh D., Mazurets O., Tyshchenko O. (2024) Datalogic relation model for automated evaluating the semantic integrity of test tasks sets by machine learning means. Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference “Innovative Solutions in Science: Balancing Theory and Practice”, Ukraine, pp. 114–125.

12. Mazurets O., Molchanova M., Klimenko V., Sobko O., Suprun P. (2024) Datalohichna model bazy danykh dlia vyiavlennia hendernoi prynalezhnosti za SVM-analizom dopysiv internet-merezh z vykorystanniam ob’iektno-oriientovanoho proiektuvannia [Datalogic model of a database for gender identification based on SVM analysis of social network posts using object-oriented design]. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences (electronic journal), vol. 337, no. 3(2), pp. 197–204. Retrieved from: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-29 (accessed 4 June 2025).

13. Mazurets O. V. (2024) Datalogic projecting for applied adaptive semantic testing. In Heritage of European Science International collective monograph, Monographic series “European Science”, Book 27, Part 3, Chapter 8, pp. 147–156. Karlsruhe, Germany. ISBN 978-3-98924-038-4.

14. Mazurets O., Molchanova M., Klimenko V., Klopotivskyi D. (2024) Model for image recognition by convolutional neural network using cloud services. Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference “Modern Scientific Research: Theoretical and Practical Aspects”, pp. 64–68.

15. Mazurets O., Sobko O., Klimenko V., Kozenko Y. (2024) Relation datalogic model for determining the diagnosis based on intellectual NLP-analysis of symptom description. Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference “Innovative Development: Synthesis of Scientific Approaches in Various Fields of Research”, pp. 61–66.

UDC 004.9 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.17

D. B. ZADNIPROVSKYI
Postgraduate Student at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0004-6637-6315

V. I. SITNIKOV
Assistant at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0005-3087-6104

OVERVIEW OF DATA ANALYSIS METHODS IN THE CONTEXT OF PROJECT MANAGEMENT ACTIVITIES

The subject of this study is the data analysis methods that can be applied in the context of project management information systems to enhance the efficiency of managerial decision-making, optimize the utilization of available resources, forecast risks, and improve project outcomes. The aim of this work is to systematize and review the key data analysis methods that can be utilized in the development of project management information systems, as well as to identify their practical applications for addressing critical tasks in project management. This study addresses the following tasks: 1) Identifying the key areas of ap-plied data analysis within project management information systems; 2) Describing data analysis methods, their purposes, and examples of their application in the context of project management; 3) Classifying data analysis methods applicable to project management information systems by types of analysis (descriptive, diagnostic, predictive, prescriptive). The following meth-ods are applied: systems analysis, classification, as well as methods of descriptive, diagnostic, predictive, and prescriptive data analysis. Achieved results: the primary types and methods of data analysis applicable to project management have been sys-tematized; the tables that contain methods description for each type of analysis, their purposes, and examples of application in project management have been developed; have been identified key advantages of applying data analysis to address project management challenges such as risk forecasting, resource optimization, and improving team efficiency; practical examples of using data analysis methods for managerial decision-making have been described. Conclusions. Data analysis is a critical tool for enhancing the efficiency of project management. The use of techniques and methods of descriptive, diagnostic, predictive, and prescriptive analysis within project management information systems ena-bles managers to obtain valuable insights for informed decision-making, improve resource utilization, forecast risks, and en-hance project outcomes. The systematization of data analysis methods applicable to project management promotes their more effective application and integration into information systems, thereby improving project planning, resource utilization, risk mitigation, and ultimately increasing the quality of project execution.

Key words: *data analysis, project management, descriptive analysis, diagnostic analysis, predictive analysis, prescriptive analysis, analysis methods.*

Д. Б. ЗАДНІПРОВСЬКИЙ
аспірант кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0002-7400-2925

В. І. СІТНІКОВ
асистент кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0005-3087-6104

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ДАНИХ У КОНТЕКСТІ ДІЯЛЬНОСТІ З УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ

Предметом дослідження *в статті є методи аналізу даних, які можуть застосовуватись в контексті інформаційних систем з управлінні проєктами з метою підвищення ефективності прийняття управлінських рішень, використання наявних ресурсів, прогнозування ризиків та покращення результатів проєктів.* ***Мета роботи*** *– систематизувати та провести огляд основних методів аналізу даних, які можуть бути використані при побудові інформаційних систем з управління проєктами, а також визначити їх практичне застосування для вирішення ключових завдань проєктного менеджменту. У статті розв'язуються такі* ***завдання****: 1) визначення ключових напрямів прикладного застосування аналізу даних в інформаційних системах з управління проєктами; 2) опис методів аналізу даних, їх призначення та приклади застосування в контексті проєктного менеджменту; 3) класифікація методів аналізу даних, які можуть застосовуватись в інформаційних системах з управління проєкта-*

ми, за типами аналізу даних (описовий, діагностичний, прогнозний, приписний); Застосовуються такі ***методи****: системний аналіз, класифікація, а також методи описового, діагностичного, прогнозного та приписного аналізу даних.* ***Досягнуті результати:*** *систематизовано основні типи та методи аналізу даних, які можуть використовуватись в управлінні проєктами; розроблено таблиці з описом методів кожного типу аналізу, їх призначенням та прикладами застосування в проєктному менеджменті; виявлено ключові переваги застосування аналізу даних для вирішення проблем управління проєктами, таких як прогнозування ризиків, оптимізація ресурсів та підвищення ефективності роботи команди; описано практичні приклади використання методів аналізу даних для прийняття управлінських рішень.* ***Висновки.*** *Аналіз даних є ключовим інструментом для підвищення ефективності управління проєктами. Використання технік та методів описового, діагностичного, прогнозного та приписного аналізу в інформаційних системах з управління проєктами дозволяє менеджерам отримувати цінну інформацію для прийняття обґрунтованих рішень, підвищувати ефективність використання ресурсів, прогнозувати ризики та покращувати результати проєктів. Систематизація методів аналізу даних, які можуть використовуватись в управлінні проєктами, сприяє їх більш ефективному застосуванню та інтеграції в інформаційні системи з метою підвищення ефективності планування та використання проєктних ресурсів, зниження ризиків та, як наслідок, підвищення якості виконання проєктів.*

Ключові слова: *аналіз даних, управління проєктами, описовий аналіз, діагностичний аналіз, прогнозний аналіз, приписний аналіз, методи аналізу.*

Introduction

In modern conditions, project management is characterized by increasing complexity, driven by the growing volume of data that must be analyzed to make informed managerial decisions. Projects frequently encounter numerous challenges, including budget overruns, delays in task execution, reduced team efficiency, and various risks that are often difficult to predict. The data generated during project implementation contains potentially valuable information, such as insights into risks, performance, schedules, budgets, costs, timelines, client feedback, and other aspects of operations.

However, without proper analysis, this data remains merely an unstructured collection of numerical and textual values that cannot be effectively utilized to support managerial decisions. The application of data analysis methods in project management enables the identification of hidden patterns, the prediction of future outcomes, the classification of projects based on specific characteristics (e.g., risk levels or efficiency), and the formulation of recommendations for process optimization. Thus, data analysis becomes a key tool for extracting valuable information necessary for making rational and well-founded decisions [8].

The absence of adequate data analysis forces managers to rely on intuition or limited information, significantly increasing the likelihood of erroneous decisions and, consequently, reducing the effectiveness of project management.

One of the primary challenges in data analysis within the field of project management is that the data is often insufficiently structured and complete or excessively large for manual analysis. Additionally, many projects face a lack of standardized approaches to data collection, processing, and integration, creating further barriers to effective managerial decision-making. Under such conditions, managers often lack access to timely, reliable, and relevant information, which negatively impacts the quality of project management.

Another significant challenge is the complexity of selecting appropriate data analysis methods. Since each project has unique objectives, methods that are effective for one project may be unsuitable for another. For instance, predictive analysis methods may be useful for estimating project completion timelines or resource planning but are likely to be less effective for generating recommendations or classifying tasks.

Moreover, there is a general consensus among data users regarding the importance of access to large volumes of information. However, several issues arise concerning its effective utilization. These issues can be classified into three key areas:

– Simplification: ensuring easy access to data and convenient data management.
– Unification: integrating analytical tools into the environments where users operate.
– Automation and self-service: developing mechanisms that allow users to obtain necessary reports in real time without the need for manual requests and processing [14].

According to a study by the International Data Corporation (IDC, 2021), global spending on big data and business analytics (BDA) solutions reached $215.7 billion in 2021, representing a 10.1 % increase compared to 2020. In 2022, this figure rose to $271.83 billion, and it is projected to grow to $655.53 billion by 2029 [3, 7].

The main part of the article

Problem statement and analysis types. Effective data management in project management requires clearly defined processes for collecting relevant information and ensuring its high quality. Data collection is a resource-intensive process, and data that is not actively used for decision-making leads to inefficient use of organizational resources. Identifying key information necessary for informed managerial decision-making allows for optimizing the data collection process by focusing only on metrics of strategic importance.

Organizations should carefully determine which metrics, analytical indicators, and reports are most significant for supporting management processes. Based on this, mechanisms for data collection should be developed or improved to

ensure data relevance, accuracy, and accessibility. High-quality project portfolio data contributes to portfolio optimization, enabling more effective decisions regarding resource allocation, project prioritization, and risk management [14].

Project management is often accompanied by a range of challenges that impact the effectiveness of project implementation. Key challenges include:

– Uncertainty and Risks: projects frequently operate under conditions of uncertainty, which can negatively affect timelines, budgets, or the quality of outcomes.

– Limited Resources: time, financial, and human resources are constrained, requiring optimal allocation and utilization.

– Dynamic Environments: changes in market conditions, technologies, or client requirements can significantly influence project execution.

– Large Volumes of Data: the growing volume of data creates difficulties in processing and analysis without modern analytical methods.

– Lack of Data Integration: data is often stored in disparate systems, complicating comprehensive analysis.

The application of data analysis in project management helps address these challenges by improving forecast accuracy, risk classification, and the formulation of recommendations for informed managerial decision-making.

From the aforementioned challenges arise the primary directions for the practical application of data analysis in project management activities, for which various types, methods, and techniques of data analysis are utilized.

The key directions for the practical application of data analysis in project management activities include the following:

– Forecasting: enables the prediction of future project outcomes, such as completion timelines, costs, or the likelihood of risks, delays, or budget overruns. For example, historical data analysis can identify project types prone to delays and uncover the causes of such delays [12].

– Classification: facilitates the categorization of projects or client groups based on factors such as risk level, complexity, or priority. This allows managers to identify projects requiring special attention and select optimal management approaches [6].

– Recommendations: based on data analysis, recommendations can be formulated to optimize processes, improve resource allocation, or select the best execution strategies. For instance, analysis can help identify tasks with the highest risk of delay and propose methods to minimize them [11].

From the perspective of data analysis types that can be applied in project management, based on their functional purpose and the tasks they address, the following are distinguished:

– Descriptive Analysis: focuses on identifying key trends and patterns in the data, enabling the assessment of the current state of the project.

– Diagnostic Analysis: aims to uncover cause-and-effect relationships that explain the observed outcomes.

– Predictive Analysis: utilizes historical data to forecast future results, such as completion timelines or the likelihood of risks.

– Prescriptive Analysis: provides recommendations for optimal actions to achieve desired outcomes, leveraging optimization models and decision-making algorithms.

Table 1 presents a summary of the main types of data analysis, each of which is designed to address specific tasks, answer particular questions, achieve defined goals, and encompass corresponding functions.

Table 1

Main types of data analysis

Type of Analysis	Question	Objective	Example of Application
Descriptive	What happened?	Establish indicators of the current state using historical business analysis data	Development/visualization of dashboards with metrics/KPIs. Comparative performance analysis. Insights/segmentation. Fact-based evaluations.
Diagnostic	Why did it happen?	Identify the causes of problems or deviations in data or processes	Analysis of cause-and-effect relationships. Detection of anomalies. Assessment of variable impacts
Predictive	What will happen?	Predict outcomes, tendencies, customer behavior, preferences, or entity characteristics	Development of “What-if” marketing scenarios and forecasting. Predictive classification of risks, behaviors, or outcomes
Prescriptive	What should we do?	Use analytical methods to demonstrate the consequences or impacts of decision options	Automation of decision-making processes. Formulation of recommendations to improve various aspects of project management. Simulation of the impact of changes on the project. Risk management

Descriptive Analysis. Descriptive analysis is aimed at answering key questions such as “What hap-pened?”, “How often?”, and “Where?”. This level of analysis serves as the foundation for data-driven deci-sion-making, as it relies on

factual data and forms the basis for developing key performance indicators (KPIs) and dashboards. Descriptive analysis involves trans-forming raw data into a format that facilitates under-standing, interpretation, reorganization, structuring, and manipulation to create summarized information that can be used for managerial decision-making [17].

This type of analysis utilizes large datasets gener-ated from historical records or observations. These da-tasets may originate from various sources, be heteroge-neous, or exist in different formats. Through specific procedures, key characteristics are identified, enabling the discovery of potentially interesting patterns. De-scriptive analysis helps uncover hidden relationships in the data, issues related to data storage, and the formu-lation of new questions requiring further investigation. The primary goal of this analysis is to simplify the complexity of data understanding and provide a more representative presentation. This is often achieved through numerical or graphical summarization, such as charts, tables, or diagrams, which allow organizations to extract valuable insights from existing data more easily [7].

For interpreting raw information within the frame-work of descriptive data analysis, the following ques-tions can be used:

– How frequently does each value (or set of values) of the relevant variable occur? For example, what is the count and percentage?
– What value best represents the «typical assessment»? For instance, how similar are the data points?
– How widely is the data distributed?
– Are there values that occur more frequently than others?
– What are the largest and smallest values?
– Are there any specific trends observed in the data?

While answers to these questions indicate that a certain event has occurred or a problem exists, they do not explain the reasons behind it. To uncover the causes of phenomena, deeper analysis is required.

Descriptive analysis focuses on detailed measure-ment of the characteristics of the studied population. During the analysis, the population is defined, all its elements are evaluated, and summary metrics such as mean values or standard deviations are calculated based on the obtained data [14].

In project management activities, the descriptive analysis methods are used to assess the current state of a project, identify key trends and patterns in the data, and form a general understanding of critical perfor-mance indicators. This provides managers with baseline information about task execution, resource utilization, timelines, and costs, serving as the foundation for fur-ther analysis and managerial decision-making.

Table 2 presents the main methods used in de-scriptive data analysis, their purpose and examples of application in the context of project management ac-tivities.

Diagnostic Analysis. Diagnostic analysis builds upon the results of descriptive analysis and focuses on answering the question, “Why did the event occur?” This type of analysis provides a deeper understanding of the causes behind patterns identified in the data. The primary goal of diagnostic analysis is to explain the reasons for anomalies and deviations by formulating and testing various hypotheses [18].

A critical aspect of conducting diagnostic analysis is the collection of detailed data. In some cases, addi-tional sources of information must be incorporated to create a complete picture, after which the conclusions are validated against the initial database.

Diagnostic analysis may involve the use of various approaches and methods, such as regression analysis, cluster analysis, time series analysis, and others [7].

In project management activities, diagnostic anal-ysis methods are used to identify cause-and-effect rela-tionships that explain observed results and analyze de-viations from planned metrics. This enables managers to gain a deeper understanding of the root causes of problems, assess the impact of various factors on pro-ject outcomes, and develop effective strategies to ad-dress these issues.

Table 3 presents the main methods employed in diagnostic analysis, their purposes, and examples of application in the context of project management ac-tivities.

Predictive Analysis. Predictive analysis is one of the most advanced types of data analysis, aimed at answering the key question: “What will happen?” It leverages the results of descriptive and diagnostic anal-ysis to identify patterns and predict “what is likely to occur” with a certain level of confidence. The accuracy and reliability of predictive analysis results largely de-pend on the quality and completeness of the input data.

With sufficient data, organizations can forecast outcomes, including those related to project risks, task performance, the impact of various factors on project execution, or the overall project portfolio.

Predictive analysis is often defined as forecasting at a more granular level, such as generating predictive scores (probabilities) for each individual element within an organization. This distinguishes it from simple fore-casting of future values. For example, predictive analyt-ics is described as “a technology that learns from expe-rience (data) to predict future behavior in order to make more effective decisions”.

In information systems, predictive analytics holds key and increasingly growing value in anticipating and preventing potential problems, enabling near-zero fail-ure rates. Furthermore, predictive analysis is increasing-ly integrated into

Table 2

Descriptive analysis techniques that could be applied to project management activities

Technique	Description	Purpose	Example of Application
Frequency distribution	Organizing and summarizing data by counting the frequency of each value or category in a dataset	Identifying the frequency of values or categories in a dataset	Tracking the frequency of completed tasks with different characteristics, project stages, or outcomes. Monitoring the occurrence of problems or risks throughout the project lifecycle
Measures of central tendency	Summarizing data by determining the central value (mean, median, mode)	Highlighting the "typical" value in a dataset	Calculating the average project completion time or task duration. Identifying the most common duration or cost of projects or specific functionalities within a project
Measures of dispersion	Quantifying the spread or variability of data (range, variance, standard deviation)	Understanding consistency or variability in a dataset	Measuring the standard deviation of task completion times to assess consistency. Analyzing variability in costs, timelines, or resource allocation. Identifying projects with significant deviations from planned metrics
Percentiles and quartiles	Summarizing data and providing information about its distribution	Representing the relative position of data points in a dataset	Evaluating project performance relative to benchmark metrics (e.g., 75th percentile of budgets). Identifying projects in the upper or lower quartile for costs or duration
Cross-tabulation	Exploring relationships between two or more categorical variables	Identifying patterns or correlations between variables	Analyzing relationships between project types and success rates. Examining correlations between team size and project completion time
Visualization techniques	Using graphical representations to summarize and present data	Facilitating data interpretation and identifying trends or patterns	Creating dashboards to visualize project progress, resource allocation, budget utilization, and risk status. Using Gantt charts to track timelines and dependencies
Data aggregation	Combining data from multiple sources or groups to create summary statistics	Providing an overall view of a dataset	Summarizing costs, resources, or hours spent across multiple projects or departments. Aggregating risk data to identify common issues in a project portfolio
Trend analysis	Identifying and describing patterns or trends in data	Understanding changes or developments in a dataset	Monitoring trends in project performance metrics over time (e.g., cost overruns, delays). Identifying seasonal patterns in project demand or resource utilization
Anomaly detection	Identifying data points that significantly deviate from the rest of the dataset	Detecting anomalies or errors in data	Identifying projects with unusually high costs, delays, or resource usage. Detecting anomalies in task completion times or budget utilization
Data summarization	Reducing large datasets to summary statistics or key metrics	Providing a concise overview of a dataset	Creating executive reports on project performance metrics for stakeholders. Reducing large datasets to key indicators for decision-making
Categorical analysis	Analyzing data divided into categories or groups	Understanding the distribution and frequency of categorical variables	Analyzing the distribution of project types in a portfolio (e.g., IT, construction, marketing). Categorizing risks or issues by severity or frequency

Table 3

Diagnostic analysis techniques that could be applied to project management activities

Method	Description	Purpose	Example of Application
Regression analysis	Examines relationships between variables to determine how changes in one variable affect another	Evaluates the impact of changes in one variable (independent) on another variable (dependent) to identify factors with the greatest influence on outcomes, aiding in problem diagnosis	Determining whether increasing team size reduces project delays
Correlation analysis	Measures the strength and direction of relationships between two or more variables	Identifies positive, negative, or no correlation between variables	Identifying relationships between project variables, such as team size and project duration. Analyzing the correlation between resource allocation and project success rates
Cluster analysis	Groups data points into clusters based on their similarity	Identifies hidden structures and patterns in data that can be used to diagnose problems or understand the causes of certain phenomena	Grouping projects by risk levl, complexity, or performance
Time series analysis	Analyzes data collected or recorded over time to identify trends, patterns, or seasonal effects	Analyzes the impact of external factors on trends, detects anomalies or deviations from expected trends, and evaluates the influence of events or changes over time	Analyzing seasonal fluctuations in project costs to determine the causes of peak expenses during specific periods
Sensitivity analysis	Measures how changes in one variable affect the outcome of a model or system	Evaluates the impact of changes in variables, such as budget, on project success. Identifies critical variables with the greatest influence on project outcomes	Analyzing how fluctuations in resource availability or team skill levels affect project completion time

prescriptive analytics to optimize deci-sion-making processes. Transformed data can also be used to improve the product lifecycle within a closed-loop system [14].

In project management, predictive analysis meth-ods are used to forecast future project outcomes, such as completion timelines, costs, the likelihood of risks, or team performance. This allows managers to evaluate potential scenarios, make informed decisions, and de-velop strategies to minimize risks and achieve project goals.

Table 4 presents the main methods employed in predictive analysis, their purposes, and examples of application in the context of project management ac-tivities.

Table 4

Predictive analysis techniques that could be applied to project management activities

Method	Description	Purpose	Example of Application
Bayesian network	A model that uses probabilistic dependencies between variables for prediction and causal analysis	Estimating event probabilities based on incomplete data and modeling complex systems	Risk management, outcome prediction
Pattern recognition	A method that analyzes data to identify patterns or trends	Detecting trends, classifying data, and forecasting based on patterns	Identifying customer behavior patterns to predict future needs
Random forest	An ensemble method that uses multiple decision trees for classification or regression	Improving prediction accuracy by combining the results of multiple decision trees	Predicting project success based on historical data about budgets and timelines
Conditional inference tree	A decision tree method that considers the statistical significance of variables	Identifying key factors influencing outcomes and forecasting based on conditional dependencies	Decision-making, risk analysis
Support vector machine (SVM)	A classification and regression algorithm that finds the optimal hyperplane to separate data	Classifying data and forecasting based on multidimensional variables	Performance analysis, predicting project success based on a set of parameters
Ensemble learning	A method that combines multiple models to improve prediction accuracy	Enhancing prediction accuracy and stability by aggregating results from different models	Outcome prediction, risk assessment
Artificial neural network (ANN)	A model that mimics the human brain to analyze complex dependencies in data	Predicting complex nonlinear relationships between variables	Forecasting project costs based on historical data and external factors
Decision tree	A method that uses a hierarchical structure to make decisions based on conditions	Identifying key factors and predicting outcomes	Decision-making, risk analysis
Heuristic clustering	A method that uses clustering to identify groups of data with similar characteristics	Detecting patterns in data and forecasting based on clusters	Predicting team performance based on clustering members by skill level
k-nearest neighbors (k-NN)	An algorithm that classifies data based on similarity to nearest neighbors	Classifying and forecasting based on data similarity	Predicting outcomes, performance analysis. Forecasting project success based on similarity to other projects with similar parameters

Prescriptive Analysis. Prescriptive analysis focuses on addressing the complex question: "What actions should be taken?" This type of analysis involves detailed and extensive research to determine the optimal path from a set of possible options.

In the context of project portfolio management, prescriptive analysis provides significant advantages by enabling organizations to select the portfolio with the highest value and the group of projects with the greatest likelihood of successful implementation. This approach enhances resource management efficiency and minimizes risks [14].

Prescriptive analysis not only predicts what will happen and when it will occur but also explains why it might happen. Furthermore, it offers decision-making options aimed at leveraging future opportunities or mitigating potential risks while demonstrating the consequences of each possible course of action [9].

A key feature of prescriptive analysis is its ability to continuously integrate new data, allowing for re-forecasting and adjustment of recommendations. This ensures automatic improvement in forecast accuracy and the generation of more effective decision options.

This approach uses hybrid data, which includes both structured information (numerical values, categories) and unstructured data (videos, images, sounds, textual data). Additionally, prescriptive analysis incorporates business rules to predict future events and develop recommendations on how best to capitalize on forecasted opportunities without compromising other organizational priorities [14].

In project management, prescriptive analysis methods are used to determine the optimal actions for achieving desired outcomes while considering resource constraints, risks, and strategic priorities. This type of analysis enables managers to formulate recommendations for resource allocation, task planning, risk management, and selecting the best decision options to ensure successful project implementation.

Table 5 presents the main methods employed in prescriptive analysis, their purposes, and examples of application in the context of project management activities.

Conclusions

Data analysis has become a critical area of focus for both researchers and practitioners in the field of project management. With the increasing volume of data available to organizations, there is a growing body of research aimed at developing data analysis methods that provide valuable insights for managerial decision-making. This article outlines the key potential applications of data analysis in project management activities and provides an overview and systematization

Table 5

Prescriptive analysis techniques that could be applied to project management activities

Method	Description	Purpose	Example of Application
Reinforcement learning	A machine learning method that uses a reward system to optimize agent actions in an environment	Predicting optimal actions in complex dynamic systems	Optimizing resource allocation in a project to minimize costs and timelines
Mixed integer programming	An optimization method that works with both integer and continuous variables	Solving optimization problems with constraints involving integer variables	Optimizing schedules and budgets
Linear programming	An optimization method that works with linear functions and constraints	Solving optimization problems where all dependencies are linear	Optimizing resource utilization in a project to achieve maximum results
Binary quadratic programming	An optimization method that works with binary variables and quadratic functions	Solving optimization problems where variables have only two possible values	Selecting the optimal set of tasks to execute within a limited budget
Nonlinear programming	An optimization method that works with nonlinear functions and constraints	Solving optimization problems with nonlinear relationships between variables	Advanced project planning. Optimizing project costs considering complex dependencies between variables
Binary linear integer programming	An optimization method that works with binary and integer variables in linear functions	Solving optimization problems where variables have only two possible values	Selecting the optimal set of functionalities/tasks for funding within a limited budget
Stochastic optimization	An optimization method that accounts for uncertainty in data	Solving optimization problems under uncertainty	Optimizing resource allocation considering the probability of project delays
Conditional stochastic optimization	An extension of stochastic optimization that incorporates additional conditions	Solving optimization problems under uncertainty with additional constraints	Optimizing project planning considering risk probabilities and funding conditions
Fuzzy linear optimization	An optimization method that accounts for fuzziness in data and constraints	Solving optimization problems under uncertain data conditions	Allocating resources under uncertainty
Robust and adaptive optimization	An optimization method that accounts for changing conditions and adapts to them	Solving optimization problems under variable data and constraints	Optimizing project planning considering changes in resource availability
Dynamic programming	An optimization method that breaks a problem into subproblems for simplification	Solving optimization problems with recursive structures	Multi-stage project planning
Random forest-based simulation	A simulation method that uses random forests to predict outcomes	Predicting outcomes based on simulations using ensemble models	Risk assessment and forecasting project success probabilities based on historical data
Risk assessment	A method that evaluates the probability and impact of risks	Identifying and assessing risks for decision-making	Simulating the impact of resource shortages on project delays based on risk assessments
Stochastic simulation	A simulation method that accounts for probabilistic dependencies between variables	Predicting outcomes in systems with uncertainty	Simulating project completion timelines considering the probability of delays
What-If scenarios	A method that evaluates outcomes under different conditions	Assessing the impact of changes on system outcomes	Analyzing the impact of budget increases on project completion timelines
Association rules	A method that identifies patterns between variables in large datasets	Detecting hidden relationships between variables	Identifying dependencies between project types and risk levels
Decision rules	A method that uses a set of rules for decision-making	Automating decision-making processes based on defined criteria	Selecting the optimal set of tasks to execute within a limited budget
Criteria-based rules	A method that uses criteria for evaluation and decision-making	Evaluating options based on defined criteria	Allocating resources. Selecting projects for funding based on profitability.
Fuzzy rules	A method that uses fuzzy logic rules for decision-making	Making decisions under uncertain data conditions	Selecting the most efficient project execution plan with fuzzy resource constraints
Comparison rules	A method that compares options with benchmark metrics	Evaluating options based on comparison with benchmark data	Performance evaluation. Selecting projects for funding based on comparison with successful analogs
Desirability function	A method that evaluates options based on a desirability function	Evaluating options to select the optimal decision	Selecting the most efficient project execution plan based on desired outcomes
Graph-based recommendations	A method that uses graphs to analyze relationships between data	Identifying optimal options based on graph structures	Optimizing workflows
Optimal path search	A method for finding the best path or sequence of actions to solve a problem in complex systems	Optimizing decision-making processes in complex systems	Selecting the optimal task execution route in a project to minimize costs or reduce dependencies and downtime

of the main types of data analysis that can be utilized in this context, as each type of analysis has its specific functional purpose, addresses particular challenges, and employs corresponding methods and techniques.

The descriptive analysis techniques presented in the article, such as frequency distribution, measures of central tendency, trend analysis, and others, enable the assessment of the current state of a project, the identification of key patterns, and the formation of a general understanding of critical performance indicators.

Diagnostic analysis methods, such as regression analysis, cluster analysis, time series analysis, and sensitivity analysis, are aimed at identifying cause-and-effect relationships among various historical project performance metrics and explaining the observed outcomes.

Predictive analysis methods utilize historical data to forecast future outcomes, such as project completion timelines, costs, or the likelihood of risk occurrences. Key predictive analysis methods include artificial neural networks, decision trees, support vector machines, ensemble learning, and the k-nearest neighbors algorithm.

Prescriptive analysis methods represent the most advanced type of analysis, as they not only predict future events but also recommend optimal actions to achieve desired outcomes. Key prescriptive analysis methods include linear and nonlinear programming, stochastic optimization, "what-if" scenarios, random forest-based simulations, and dynamic programming. This type of analysis addresses a critical gap in project management by providing managers with actionable recommendations for future steps. Planning and monitoring are the most essential components of project management activities, as the ultimate success of each project depends on them. When a manager possesses the knowledge and skills to apply prescriptive analysis methods, it significantly increases the likelihood of achieving project goals within the defined timelines, ensuring that the «iron triangle» of project management – time, cost, and quality – remains intact.

The developed tables, detailing the methods for each type of analysis, their purposes, and examples of application in the context of project management, serve as practical tools that enable the selection of relevant methods to address specific challenges encountered during the practical activities of project management.

The application of data analysis methods in project management offers numerous advantages. Specifically, it enhances the accuracy of forecasts, which is critically important for resource planning, scheduling, and budgeting. Additionally, data analysis facilitates the early detection of risks, enabling the development of effective strategies for their mitigation. Analytical methods also help optimize resource allocation, ensuring their efficient use, and contribute to improving team productivity by identifying weaknesses in processes and suggesting ways to address them.

Planning and monitoring are key components of project management activities, significantly influencing the success of project implementation and the effectiveness of managerial decision-making. Providing managers with the necessary analytical tools and equipping them with the ability to apply data analysis methods in management processes greatly increases the likelihood of achieving project objectives within the defined timelines and budgets. Such approaches support adherence to the principles of the "iron triangle" of project management, which emphasizes a balance between time, cost, and quality, ensuring the successful execution of projects in dynamic environments.

Thus, data analysis is an integral component of modern project management. Information systems that incorporate combinations of the described methods and techniques are becoming increasingly powerful tools, enabling managers to make informed decisions, enhance project management efficiency, and achieve strategic goals.

References

1. Akerkar, B. (2013) "Big Data Computing", Chapman and Hall/CRC Press, Boca Raton, 564 p. ISBN 9781466578371

2. Barbosa, M. W., Vicente, A. D. L. C., Ladeira, M. B., & Oliveira, M. P. V. D. (2018), "Managing Supply Chain Resources with Big Data Analytics: A Systematic Review", International Journal of Logistics Research and Applications, Vol. 21, No. 3, P. 177–200. doi: http://doi.org/10.1080/13675567.2017.1369501

3. Brimco Analytics (2023), "Big Data Analytics Statistics", available at: https://www.brimco.io/analytics/big-data-analytics-statistics/ (last accessed 30.03.2025).

4. CMMI Institute (2011), "Standard CMMI Appraisal Method for Process Improvement (SCAMPI)", Version 1.3, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 282 p. doi: http://doi.org/10.1184/R1/6584330.v1

5. Gröger, C., Schwarz, H., & Mitschang, B. (2014), «Prescriptive Analytics for Recommendation-Based Business Process Optimization», International Conference on Business Information Systems, P. 25–37. doi: http://doi.org/10.1007/978-3-319-06695-0_3

6. Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. (2009), "The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction, 767 p. ISBN: 978-0387848570

7. Ivanova, N. (2023), "Classification of Basic Methods for Data Analysis in Industry", Conference: Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Vol. 66/2023 At: Sofia, Bulgaria. doi: http://doi.org/10.5281/zenodo.8335379

8. Kerzner, H. (2022), «Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling», 13th ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, USA, 880 p.: ISBN: 978-1-119-80537-3.

9. Lepenioti, K., Bousdekis, A., Apostolou, D., Mentzas, G. (2020), "Prescriptive Analytics: Literature Review and Research Challenges", International Journal of Information Management, Vol. 50, P. 57–70. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.04.003

10. Maheshwari A. (2023) "Data Analytics", 2nd Edition, Mc Graw Hill India, 176p. ISBN: 978-9355324559.

11. Marr, B. (2015), "Big Data: Using SMART Big Data, Analytics and Metrics to Make Better Decisions and Improve Performance", Wiley, Hoboken, NJ, 256 p. ISBN: 978-1-118-96583-2.

12. Montgomery, D. C., Runger, G. C. (2018), "Applied Statistics and Probability for Engineers", Wiley, Hoboken, NJ, 720p.: ISBN: 978-1-119-40036-3.

13 Project Management Institute (2021), "A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)", 7th Edition, PMI, Newtown Square, PA? 274 p. ISBN: 978-1628256642.

14. Spalek, S. (2018), "Data Analytics in Project Management", (1st ed.). Auerbach Publications, 232 p. doi: https://doi.org/10.1201/9780429434891

15. Tan P., Steinbach M., Kumar V. (2013) "Introduction to Data Mining". Harlow, Pearson, 736 p. ISBN: 978-1-292-02615-2.

16. Vidgen, R., Shaw, S., Grant, D. B. (2017), "Management Challenges in Creating Value from Business Analytics", European Journal of Operational Research, Vol. 261, No. 2, P. 626–639. doi: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.02.023

17. Wolniak, R. (2023), "The Concept of Descriptive Analytics", Scientific Papers of Silesian University of Technology, Organization and Management Series, Vol. 2023, P. 696–715. doi: http://doi.org/10.29119/1641-3466.2023.172.42

18. Wolniak, R., Grebski, W. (2023), "The Concept of Diagnostic Analytics", Scientific Papers of Silesian University of Technology, Organization and Management Series, Vol. 175, P. 651–669. doi: http://doi.org/10.29119/1641-3466.2023.175.41

19. Yim R., Castaneda J., Doolen T., Tumer I., Malak R. (2015) "A study of the impact of project classification on project risk indicators", International Journal of Project Management, Vol. 33, Issue 4, P. 863-876 doi: https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2014.10.005

УДК 004; 685 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.18

Б. М. ЗЛОТЕНКО
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-0870-8535

Д. В. СТАЦЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-3064-3109

М. І. ГОЛЬДБЕРГ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-9982-7264

СТВОРЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ КОМП'ЮТЕРНОГО МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Розглянуті сучасні тенденції створення об'єктів інтелектуальної власності на основі використання методів комп'ютерного математичного моделювання у легкій промисловості. Наведені результати досліджень у створенні нових технологій лиття під тиском деталей взуття з полімерних матеріалів. Запропоновано метод виготовлення багатоколірних підошов шляхом одночасного упорскування в прес-форму різних полімерних матеріалів. Розроблена комп'ютерна математична модель течії розплаву полімерного матеріалу в прес-формі, яка дозволяє визначити її конструктивні параметри для отримання підошов з заданими властивостями. Досліджено процес затягування верху взуття підвищеної формостійкості з шкіряної сировини, яка пройшла спеціальну обробку з використанням електроактивованого середовища та ензимів. Запропоновано технологію виготовлення комфортного взуття за індивідуальним замовленням, яка включає в себе процеси 3D-сканування стопи людини і 3D-друк накладок на поверхню колодки для врахування анатомічних особливостей замовника. Розроблено експериментальну установку для визначення тиску внутрішньої поверхні взуття на стопу людини, яка складається з персонального комп'ютера, і мікроконтролера Arduino з давачами сили. Впровадження комп'ютерних технологій для проведення теоретичних наукових досліджень у взуттєвій галузі відкриває можливості для здійснення математичного моделювання складних технологічних процесів і прогнозування експлуатаційних властивостей продукції, що випускається. Виготовлення дизайнерського взуття супроводжується створенням деталей складної геометричної форми, використанням нетрадиційних для взуттєвого виробництва матеріалів. Використання у взуттєвому виробництві інноваційних комп'ютерних технологій стало поштовхом для розробки і впровадження креативних і патентоспроможних технологічних, конструкторських і дизайнерських рішень.

Ключові слова: *інтелектуальна власність, математичне моделювання, комп'ютерні науки, легка промисловість, технологія, обладнання.*

B. M. ZLOTENKO
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Computer Engineering and Electromechanics
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0002-0870-8535

D. V. STATSENKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Computer Engineering and Electromechanics
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0002-3064-3109

M. I. GOLDBERG
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Computer Engineering
and Electromechanics
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0002-9982-7264

CREATION OF INTELLECTUAL PROPERTY OBJECTS BASED ON THE USE OF COMPUTER TECHNOLOGIES IN FOOTWEAR PRODUCTION

Modern trends in the creation of intellectual property objects based on the use of computer mathematical modeling methods in light industry are considered. The results of research into the creation of new technologies for injection molding of shoe parts from polymer materials are presented. A method for manufacturing multi-colored soles by simultaneously injecting different polymer materials into a mold is proposed. A computer mathematical model of the flow of the melt of a polymer material in a mold is developed, which allows determining its design parameters for obtaining soles with specified properties. The process of tightening the upper of shoes with increased dimensional stability from leather raw materials that have undergone special treatment using an electroactivated medium and enzymes is studied. A technology for manufacturing comfortable shoes on an individual order is proposed, which includes the processes of 3D scanning of a human foot and 3D printing of overlays on the surface of the insole to take into account the anatomical features of the customer. An experimental setup has been developed to determine the pressure of the inner surface of the shoe on a person's foot, which consists of a personal computer and an Arduino microcontroller with force sensors. The introduction of computer technologies for conducting theoretical scientific research in the footwear industry opens up opportunities for mathematical modeling of complex technological processes and predicting the operational properties of manufactured products. The production of designer shoes is accompanied by the creation of parts of complex geometric shape, the use of materials that are unconventional for footwear production. The use of innovative computer technologies in footwear production has become an impetus for the development and implementation of creative and patentable technological, engineering and design solutions.

Key words: *intellectual property, mathematical modeling, computer science, light industry, technology, equipment.*

Постановка проблеми

Сучасна легка промисловість характеризується необхідністю швидкого впровадження інновацій стосовно зовнішнього вигляду та функціональних властивостей продукції, що випускається, відповідно до уподобань споживачів. При цьому постійний попит на новий дизайн і споживчі властивості взуття зумовлений не лише впливом модних тенденцій, а й новими можливостями втілення у практику креативного потенціалу виробників, які створюються розвитком нових, в тому числі комп'ютерних технологій. Мінливі потреби споживачів спонукають зміни на ринку, які все більше прагнуть отримати високотехнологічний продукт з модним дизайном. Це не тільки долає багато обмежень традиційного дизайну, покращуючи як геометричні форми деталей взуття, так і поширення інноваційних виробничих технологій, але й створює можливості для персоналізованих дизайнерських рішень, адаптованих до конкретних вимог (наприклад, розміри виробу, варіанти кольорів, морфологічна форма, залежно від фізичних характеристик користувача). Впровадження у взуттєве виробництво інноваційних технологій і дизайнерських ідей потребує широкого використання сучасних методів комп'ютерного математичного моделювання і призводить до народження нових конструкторських і технологічних рішень у вигляді об'єктів інтелектуальної власності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Значного прогресу у виробництві взуття вдалося досягти завдяки впровадженню нових технологій у галузі комп'ютерних наук (таких як 3D-друк, 3D-сканування, 3D-в'язання та використання сенсорів) на різних етапах проектування та виробництва [1]. Тривимірний друк поступово спрощує виробництво об'єктів зі складною геометрією, яка раніше була недосяжна при виробництві за допомогою традиційних методів, таких як лиття. Деталі взуття складної геометричної форми можна виготовляти щоразу відповідно до запиту з боку ринку та коригувати за потреби, створюючи взуття, яке відповідає специфічним потребам для споживачів [2, 3].Технологія тривимірного друку дозволяє автоматизувати виробництво всього взуття або його частин.

Тривимірне сканування дозволяє створювати цифрові моделі фізичних тіл, фіксуючи антропометричні вимірювання, вирішальні для точного та персоналізованого дизайну взуття [4–6]. Ця технологія спрощує процес пошуку інформації, підвищуючи точність та достовірність, одночасно зменшуючи часові обмеження. Крім того, отримані 3D-моделі можна використовувати для 3D-друку або для проведення випробувань взуття на міцність на етапі його проєктування [7, 8].

Сенсорні технології все частіше інтегруються у взуття, що дозволяє здійснювати більш широкий моніторинг та контроль кроків і рухів, а також оцінювати умови носіння взуття окремими категоріями користувачів, включаючи спортсменів та людей похилого віку. Комп'ютерне математичне моделювання, таке як на основі використання

методу скінченних елементів, служить цінним інструментом для прогнозування властивостей взуття в процесі носіння, задовольняючи основні вимоги до дизайну, довговічності, комфорту та естетики, враховуючи такі фактори, як форма та розмір стопи [9].

Використання комп'ютерно-інтегрованих сенсорних систем дозволяє проводити дослідження та випробування нових видів взуття, які проводяться для запобігання ковзанню, падінням та травмам у різних повсякденних заходах, таких як робота, спорт та ходьба. Сенсорні системи широко використовуються в біомеханіці, яка зосереджується на моніторингу ходи та визначенні фаз ходи для збору інформації про користувача, тим самим сприяючи оптимізації дизайну взуття. Нарешті, самі матеріали відіграють певну роль у створенні більш екологічного взуття, оскільки дослідники досліджують варіанти з меншою кількістю обмежень, таких як жорсткість, та вивчають їх ширше застосування [10].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є: створення патентоспроможних конструктивних і технологічних рішень у вигляді об'єктів інтелектуального права за результатами інноваційних наукових досліджень у взуттєвій галузі, на основі використання сучасних методів комп'ютерного математичного моделювання.

Виклад основного матеріалу дослідження

Покращення комфортності та довговічності взуття нерозривно пов'язане з пошуком нових матеріалів з покращеними фізико-механічними властивостями і застосуванням нових технологічних процесів і обладнання для їх переробки у взуттєві деталі. Однією з таких технологій стало лиття під тиском деталей взуття з полімерних матеріалів, що дало можливість отримувати підошви з шарами різного кольору і вставками з підвищеною гнучкістю та зносостійкістю. Виготовлення багатошарових підошов відбувається шляхом почергового прилиття різних частин підошви до попередньо сформованого шару, або верху взуття.

Математичне моделювання процесу лиття, зокрема течії розплаву полімерного матеріалу при заповнення прес-форми дозволили визначити необхідні технологічні параметри такі, як температура розплаву, тиск лиття, тривалість охолодження виробу. Останнім часом використання комп'ютерних технологій відкрило можливості для дослідження процесу лиття на основі числового моделювання, що значно підвищило точність розрахунків і безпосередньо вплинуло на якість виробів. Використання числового моделювання дозволяє розглянути можливість впровадження інноваційного методу лиття підошов з одночасним упорскуванням розплаву різних полімерних матеріалів в прес-форму для формування її частин, що відрізняються кольором або фізико-механічними властивостями. Для цього створена числова модель заповнення розплавом прес-форми у вигляді ізотермічної плоскої течії розплаву з декількох впускних отворів на основі використання рівнянь руху Нав'є–Стокса (1, 2), нерозривності (3) і Лапласа (4):

$$-\frac{\partial \phi}{\partial x}+\upsilon\cdot\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)=0; \quad (1)$$

$$-\frac{\partial \phi}{\partial y}+\upsilon\cdot\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)=0. \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0. \quad (3)$$

$$\nabla^2\phi=0. \quad (4)$$

де u, v – складові швидкості, м^2/с; P – тиск, Па; ρ – густина розплаву м^3/с; υ – кінематичний коефіцієнт в'язкості розплаву, м^2/с; $\phi=\frac{P}{\rho}$.

В результаті числового моделювання процесу заповнення прес-форми отримано розподіл полімерних матеріалів у виробі при їх одночасному литті.

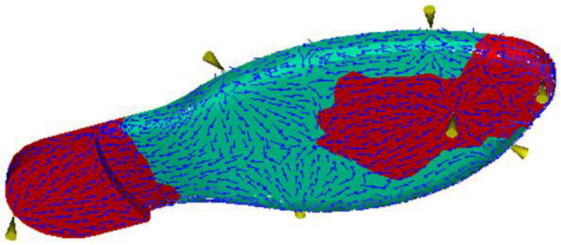


Рис. 1. Результати математичного моделювання процесу заповнення прес-форми

Використовуючи числове моделювання, можна визначити конструктивні параметри прес-форми і технологічні характеристики процесу лиття для забезпечення заданої конфігурації складових частин підошви з різних полімерних матеріалів, що дає можливість покращити експлуатаційні властивості і дизайн взуття. Крім того, одночасне формування частин підошви зменшує тривалість технологічного циклу і витрати енергії на охолодження розплаву. В результаті проведених досліджень розроблена конструкція машини для лиття підошов при одночасному заповненні прес-форми різними полімерними матеріалами і отримано деклараційний патент України № 7815 «Машина для лиття багатоколірної підошви взуття», опублікований 15.07.05 р. в Бюлетені № 7.

Результати комп'ютерного моделювання за допомогою програмного забезпечення Mathcad дозволили визначити технологічні параметри процесу затяжки на колодці заготовок верху взуття із шкурок кроля, замочування яких відбувалось у електроактивованому середовищі. При цьому були враховані особливості хутрового матеріалу, які полягають у підвищенні його формостійкості за рахунок збільшення еластичної і пластичної складової деформації в процесі затягування заготовки верху взуття на колодці. На основі отриманих результатів досліджень було отримано патент на корисну модель України № 60836 «Спосіб відмочування хутрової сировини», опублікований 25.06.2011 у бюлетені № 12. Використання цього способу зволоження дозволило на 30 % збільшити вологовміст шкіряної сировини в процесі замочування, що дозволяє удосконалити процес формування верху і формостійкість взуття в процесі носіння.

Комп'ютерне числове моделювання процесу затяжки верху взуття на колодці здійснювалось також для розрахунку напружень і деформацій у шкіряному матеріалі із великої рогатої худоби, фізико-механічні властивості якого були модифіковані під дією ензимів. Це дозволило спроєктувати технологічний процес затяжки і визначити геометричні параметри заготовки верху для забезпечення заданих умов формування (рис. 2).

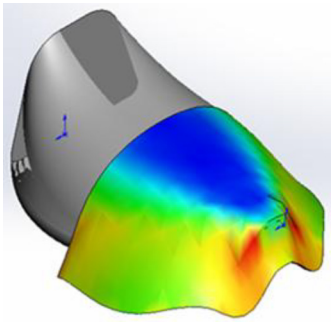


Рис. 2. Результати математичного моделювання процесу затягування заготовки верху взуття на колодці

В результаті проведених досліджень вдалося забезпечити формостійкість взуття з верхом із шкіри великої рогатої худоби, пом'якшеної за рахунок використання спеціальних препаратів, що містять відповідні ензими. Отримано деклараційний патент України № 77317 «Спосіб визначення пластичності шкіряної голини», опублікований 11.02.2013 р. в Бюлетені № 3.

Поширення інформаційно-комп'ютерних технологій у взуттєвому виробництві призвело до появи таких інноваційних засобів, як 3D-сканування стоп людини і 3D-друк взуттєвих деталей та елементів взуттєвого обладнання. 3D-сканування було використане для визначення індивідуальних особливостей стоп людини в процесі виготовлення взуття за індивідуальним замовленням. В результаті аналізу отриманих даних було розроблено спосіб коригування поверхні колодок шляхом використання спеціальних накладок, отриманих шляхом 3D-друку (рис. 3).

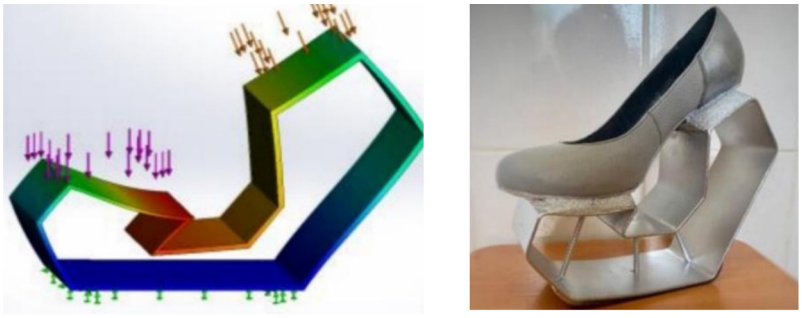


Рис. 3. Вигляд модифікованої колодки з накладкою

При цьому під час проєктування внутрішньої форми взуття забезпечувались комфортні величини тиску на стопу, які визначались за допомогою спеціально розробленої установки. Вимірювальна система включає у себе персональний комп'ютер і мікроконтролер Arduino з системою давачів сили. Далі, базуючись на результатах оцінювання замовником ступеню комфорту, були розраховані основні геометричні параметри внутрішньої

форми взуття, з урахуванням силової взаємодії заготовки верху з модифікованою колодкою в процесі затягування. В результаті досліджень було отримано патент України на корисну модель № 148995 «Макет-трансформер взуття», опублікований 05.10.2021 р. в Бюлетені № 40.

Числове комп'ютерне моделювання процесу навантаження елементів при носінні дизайнерського взуття дозволило забезпечити необхідну жорсткість і міцність елементів конструкції, враховуючи особливості складної геометричної форми низу. На основі використання засобів трансформації та гармонізації розроблено структуру етапів формоутворення художніх об'єктів для отримання сучасних форм, що дозволило реалізувати новий підхід до художнього проектування взуття. На основі розроблених підходів до вибору форм та методів формоутворення було створено ескізи та розроблено 3D-моделі деталей низу взуття з подальшим програмним аналізом навантаження на підошву. Розроблено нові форми деталей низу взуття за допомогою принципів трансформації та створено автоматизованими методами проектування модель, яка може бути використана в технологічній підготовці до виготовлення продукції легкої промисловості. Встановлено закономірності процесів трансформації для вдосконалення художнього проектування взуття на принципах біоніки та стилізації. Враховуючи, що складність конструкцій та поява нових просторових рішень ставлять перед дизайнерами складніші технічні завдання для реалізації дизайнерських проектів, було запропоновано метод розрахунку міцності та стійкості виробів складних геометричних форм з урахуванням матеріалів, з яких вони виготовлені. В результаті виконаної роботи було розроблено жіноче взуття конструкції «човник» з припуском на задній шов (рис. 4).



а ***б***

Рис. 4. Результати проєктування взуття: *а*) математичне моделювання; *б*) зовнішній вигляд

Складна форма деталей взуття вимагає відповідального підходу до забезпечення їхньої працездатності. Загальновідомо, що взуття в процесі носіння отримує різні навантаження, і зазнає різних видів деформації його деталей. У заданих межах ці деформації є корисними та необхідними для комфортного самопочуття власника взуття. При жорсткій конструкції взуття швидко виникає відчуття дискомфорту та втоми. І навпаки – гнучка та еластична конструкція допомагає підтримувати комфорт протягом тривалого часу. Однак, занадто гнучке взуття також швидко викликає втому, а недостатня фіксація стопи може призвести до травм. Крім того, у разі значних деформацій у матеріалах деталей взуття можуть виникнути напруження, що перевищують їхню міцність і спричиняють руйнування цих деталей. Тому на етапі проектування взуття дуже важливим є його розрахунок на міцність.

Для аналізу навантажень, які виникатимуть в елементах взуття під час його носіння, було використано програмне забезпечення SolidWorks. На рис. 4, *а*) показано нерівномірний розподіл тиску на поверхню підошви з урахуванням кута нахилу стопи. В результаті моделювання було виявлено, що найслабшою частиною конструкції є її середня частина. Саме ця область отримує найбільші деформаційні навантаження. Для її посилення було запропоновано використовувати додатковий елемент армування. Особливістю низу розробленого взуття є наявність платформи: дизайн класичної платформи перетворено на геометричний об'єкт, який має не лише функціональне призначення, а й виступає декором. Модель базується на контрастних кольорах, що надають взуттю більш естетичного, яскравого вигляду. Всі деталі верху виготовлені з натуральних матеріалів. Вузол устілки складається з основної устілки, напівустілки та металевої устілки; підкладка, яка заповнює простір між контурами краю лопатки. Платформа виготовлена методом штампування з прокатаної металевої стрічки товщиною 2 мм (сталь СТ-3).

Висновки

Впровадження комп'ютерних технологій для проведення теоретичних наукових досліджень у взуттєвій галузі відкриває можливості для здійснення математичного моделювання складних технологічних процесів і прогнозування експлуатаційних властивостей продукції, що випускається. Комп'ютерне математичне моделювання дозволяє врахувати велику кількість виробничих факторів, взяти до уваги і задовольнити вимоги споживачів, забезпечити конкурентоспроможність виробів. Використання комп'ютерних апаратних і програмних засобів для створення експериментального обладнання, обробки результатів експериментів і перевірки ефективності

впровадження результатів досліджень підвищує ступінь обґрунтованості запропонованих технологічних і конструкторських рішень.

Виготовлення дизайнерського взуття супроводжується створенням деталей складної геометричної форми, використанням нетрадиційних для взуттєвого виробництва матеріалів, що ускладнює розрахунки для забезпечення необхідної міцності та комфортності виробів і вимагає використання можливостей комп'ютерного математичного моделювання.

Використання у взуттєвому виробництві інноваційних комп'ютерних технологій стало поштовхом для розробки і впровадження креативних і патентоспроможних технологічних, конструкторських і дизайнерських рішень, що свідчить про перспективність подальшого розвитку у сфері створення об'єктів інтелектуальної власності.

Список використаної літератури

1. Rivera, M. L.; Moukperian, M.; Ashbrook, D.; Mankoff, J.; Hudson, S. E. Stretching the Bounds of 3D Printing with Embedded Textiles. In Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems, Denver Colorado, CO, USA, 6–11 May 2017; Association for Computing Machinery: New York, NY, USA, 2017; pp. 497–508. https://doi.org/10.1145/3025453.3025460

2. Davia-Aracil, M.; Hinojo-Pérez, J. J.; Jimeno-Morenilla, A.; Mora-Mora, H. 3D printing of functional anatomical insoles. Comput. Ind. 2018, 95, 38–53. https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.12.001

3. Xiuqin Shang, Zhen Shen, Gang Xiong, Fei-Yue Wang, Sheng Liu, Timo R. Nyberg, Huaiyu Wu & Chao Guo (2019) Moving from mass customization to social manufacturing: a footwear industry case study, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 32:2, 194–205, DOI: 10.1080/0951192X.2018.1550675

4. Allan, J. J., Munteanu, S. E., Bonanno, D. R. et al. Methodological and statistical approaches for the assessment of foot shape using three-dimensional foot scanning: a scoping review. J Foot Ankle Res 16, 24 (2023). https://doi.org/10.1186/s13047-023-00617-z

5. Telfer, S., Woodburn, J. The use of 3D surface scanning for the measurement and assessment of the human foot. J Foot Ankle Res 3, 19 (2010). https://doi.org/10.1186/1757-1146-3-19

6. Papuga MO, Burke JR. The reliability of the Associate Platinum digital foot scanner in measuring previously developed footprint characteristics: a technical note. J Manipulative Physiol Ther. (2011) Feb;34(2):114-8. doi: 10.1016/j.jmpt.2010.12.008. PMID: 21334543

7. Li, J., Jung, I. & Lee, S. Analysis of midsole gait in running shoes with various 3d printed biomimetic structure. Sci Rep 15, 8399 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-92235-x

8. Fadeel, A., Abdulhadi, H., Newaz, G., Srinivasan, R., & Mian, A. (2022). Computational investigation of the post-yielding behavior of 3D-printed polymer lattice structures. Journal of Computational Design and Engineering, 9(1), 263–277. https://doi.org/10.1093/jcde/qwac001

9. Leshchyshyn M., Zlotenko B., Synyuk O, KuleshovaS, Onofriichuk V., Mykhailovskyi Y. 3D printing of pads on lasts utilized in the production of custom-made comfortable footwear // Leather and Footwear Journal 23 (2023) 4, pp. 231–240. DOI: https://www.revistapielarieincaltaminte.ro/vol23_4.html

10. Zhang, J. et al. Efficacy of auxetic lattice structured shoe sole in advancing footwear comfort – From the perspective of plantar pressure and contact area. Front. Public Health 12, 1412518. https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1412518 (2024)

References

1. Rivera, M. L.; Moukperian, M.; Ashbrook, D.; Mankoff, J.; Hudson, S.E. Stretching the Bounds of 3D Printing with Embedded Textiles. In Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems, Denver Colorado, CO, USA, 6–11 May 2017; Association for Computing Machinery: New York, NY, USA, 2017; pp. 497–508. https://doi.org/10.1145/3025453.3025460

2. Davia-Aracil, M.; Hinojo-Pérez, J.J.; Jimeno-Morenilla, A.; Mora-Mora, H. 3D printing of functional anatomical insoles. Comput. Ind. 2018, 95, 38–53. https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.12.001

3. Xiuqin Shang, Zhen Shen, Gang Xiong, Fei-Yue Wang, Sheng Liu, Timo R. Nyberg, Huaiyu Wu & Chao Guo (2019) Moving from mass customization to social manufacturing: a footwear industry case study, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 32:2, 194-205, DOI: 10.1080/0951192X.2018.1550675

4. Allan, J. J., Munteanu, S. E., Bonanno, D. R. et al. Methodological and statistical approaches for the assessment of foot shape using three-dimensional foot scanning: a scoping review. J Foot Ankle Res 16, 24 (2023). https://doi.org/10.1186/s13047-023-00617-z

5. Telfer, S., Woodburn, J. The use of 3D surface scanning for the measurement and assessment of the human foot. J Foot Ankle Res 3, 19 (2010). https://doi.org/10.1186/1757-1146-3-19

6. Papuga MO, Burke JR. The reliability of the Associate Platinum digital foot scanner in measuring previously developed footprint characteristics: a technical note. J Manipulative Physiol Ther. (2011) Feb;34(2):114-8. doi: 10.1016/j.jmpt.2010.12.008. PMID: 21334543

7. Li, J., Jung, I. & Lee, S. Analysis of midsole gait in running shoes with various 3d printed biomimetic structure. Sci Rep 15, 8399 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-92235-x

8. Fadeel, A., Abdulhadi, H., Newaz, G., Srinivasan, R., & Mian, A. (2022). Computational investigation of the post-yielding behavior of 3D-printed polymer lattice structures. Journal of Computational Design and Engineering, 9(1), 263–277. https://doi.org/10.1093/jcde/qwac001

9. Leshchyshyn M., Zlotenko B., Synyuk O, KuleshovaS, Onofriichuk V., Mykhailovskyi Y. 3D printing of pads on lasts utilized in the production of custom-made comfortable footwear // Leather and Footwear Journal 23 (2023) 4, pp. 231–240. DOI: https://www.revistapielarieincaltaminte.ro/vol23_4.html

10. Zhang, J. et al. Efficacy of auxetic lattice structured shoe sole in advancing footwear comfort – From the perspective of plantar pressure and contact area. Front. Public Health 12, 1412518. https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1412518 (2024)

УДК 004.75+004.052+004.056+005.8 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.19

В. В. КОВАЛЬ
кандидат фізико-математичних наук,
старший викладач кафедри кібербезпеки
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0002-1593-5605

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ХМАРНОЇ МІГРАЦІЇ

У статті представлено аналіз теоретичних засад хмарної міграції – процесу переходу від традиційної локальної IT-інфраструктури до хмарних рішень. Підкреслено, що сучасні умови функціонування бізнесу та державного сектору характеризуються зростаючими вимогами до масштабованості, гнучкості та інформаційної безпеки, які часто не можуть бути задоволені за допомогою застарілих локальних систем. Однак попри численні переваги хмарних технологій, міграція до хмари супроводжується низкою викликів, пов'язаних із захистом даних, сумісністю, юридичними вимогами та ризиками кібербезпеки. На основі аналізу сучасних досліджень, у тому числі міжнародних та українських наукових публікацій, у роботі виділено три ключові аспекти, які мають бути враховані при хмарній трансформації, а саме: (1) недоліки традиційної локальної IT-інфраструктури, що включають високу вартість утримання, обмежену масштабованість, технічну складність підтримки та низьку стійкість до аварій; (2) переваги хмарних рішень, серед яких – гнучке масштабування, економічність, наявність сервісних моделей IaaS, PaaS, SaaS, автоматизоване управління та відповідність міжнародним стандартам безпеки; (3) проблематика безпечного перенесення сервісів і даних, яка охоплює питання шифрування, управління доступом, сумісності та дотримання правових норм. Увагу приділено також сучасним практикам захисту інформації в хмарних середовищах, таким як пентестинг, мікросегментація, використання багатофакторної аутентифікації, а також моделі управління ризиками. У роботі пропонується системний підхід до планування та реалізації хмарної міграції, що передбачає врахування специфіки бізнес-процесів, технологічних обмежень, нормативно-правового поля та загроз інформаційної безпеки. Результати дослідження можуть бути використані як основа для розробки стратегій цифрової трансформації в різних галузях, а також як аналітична база для подальших наукових і прикладних розробок у сфері хмарної безпеки та оптимізації IT-інфраструктур.

Ключові слова: *хмарні обчислення, хмарна міграція, IT-інфраструктура, цифрова трансформація, інформаційна безпека, хмарні сервіси, управління ризиками, кібербезпека, захист доступу.*

V. V. KOVAL
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Cybersecurity
Sumy State University
ORCID: 0000-0002-1593-5605

THEORETICAL FOUNDATIONS OF CLOUD MIGRATION

The article presents an analysis of the theoretical foundations of cloud migration – the process of transitioning from traditional on-premises IT infrastructure to cloud-based solutions. It emphasizes that the current conditions of business operations and the public sector are marked by increasing demands for scalability, flexibility, and information security, which are often unattainable using outdated local systems. However, despite the numerous advantages of cloud technologies, the migration process is accompanied by a range of challenges related to data protection, compatibility, legal compliance, and cybersecurity risks. Based on the analysis of recent studies, including both international and Ukrainian scientific publications, the paper identifies three key aspects that must be considered during cloud transformation: (1) the shortcomings of traditional on-premises IT infrastructure, including high maintenance costs, limited scalability, technical complexity of support, and low resilience to failures; (2) the advantages of cloud-based solutions, such as flexible scalability, cost-effectiveness, the availability of service models like IaaS, PaaS, and SaaS, automated management, and compliance with international security standards; and (3) the challenges of securely transferring services and data, covering issues such as encryption, access control, system compatibility, and adherence to legal regulations. The article also focuses on modern practices for securing information in cloud environments, including penetration testing, microsegmentation, the use of multi-factor authentication, and risk management models. A systematic approach to planning and implementing cloud migration is proposed, taking into account the specifics of business processes, technical limitations, regulatory frameworks, and information security threats. The results of the study can serve as a foundation for developing digital transformation strategies across various industries, as well as an analytical basis for further scientific and applied developments in the field of cloud security and IT infrastructure optimization.

Key words: *cloud computing, cloud migration, IT infrastructure, digital transformation, information security, cloud services, risk management, cybersecurity, access protection.*

Постановка проблеми

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується стрімким зростанням обсягів оброблюваної та інформації, яка зберігається, що вимагає нових підходів до побудови та експлуатації ІТ-інфраструктури. Традиційні локальні рішення вже не в змозі забезпечити належний рівень масштабованості, доступності та оперативного реагування на зміну бізнес-вимог. Усе це актуалізує необхідність переходу до хмарних технологій, які пропонують нові моделі управління ресурсами та обробки даних.

Незважаючи на значні перспективи, процес хмарної міграції пов'язаний з низкою технічних, організаційних та безпекових викликів. Необхідно враховувати складність перенесення критичних сервісів та даних, можливість втрати контролю над ними, а також питання сумісності з існуючими системами. Крім того, хмарні рішення вимагають перегляду політик управління доступом, резервного копіювання, моніторингу та аудиту, що потребує комплексного аналізу з боку фахівців.

Сьогодні багато організацій не мають уніфікованих підходів до хмарної міграції, що призводить до фрагментарних рішень, зниження надійності та виникнення нових загроз. З огляду на це, постає потреба в теоретичному обґрунтуванні основ хмарної міграції, вивченні її переваг і ризиків, а також розробці методологічних основ безпечного та ефективного переходу до хмарних середовищ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останні роки позначилися значним зростанням інтересу до хмарної міграції як стратегічного компоненту цифрової трансформації бізнесу та державних інституцій. Згідно з сучасними дослідженнями, опублікованими після 2020 року, перехід до хмарних рішень супроводжується не лише технологічними змінами, а й трансформацією регуляторних підходів, питань кібербезпеки та цифрового суверенітету.

У роботі [1] проведено системний аналіз цифрового суверенітету та ідентичності в умовах зростаючої інтеграції хмарних технологій. Автори акцентують увагу на моделі Self-Sovereign Identity (SSI), що набуває все більшого значення у контексті децентралізованих хмарних інфраструктур. Дослідження підкреслює переваги SSI, такі як підвищення конфіденційності, зменшення залежності від централізованих провайдерів та покращення механізмів цифрової довіри. Однак окреслюються й виклики, зокрема складність регуляторної адаптації, проблеми сумісності з існуючими стандартами та ризики, пов'язані з кібербезпекою.

У роботі [2] представлено систематичний огляд ключових аспектів кібербезпеки в хмарних інфраструктурах. Дослідження акцентує увагу на таких критичних проблемах, як витоки даних, пов'язані з неправильним налаштуванням прав доступу або вразливостями в API; відповідність регуляторним вимогам (наприклад, GDPR, HIPAA, ISO 27001); ефективні механізми захисту, регулярний аудит безпеки для виявлення аномалій. Автори підкреслюють, що інтеграція цих практик створює основу для розробки надійних політик хмарної міграції, зокрема в контексті захисту критичної інфраструктури.

Як зазначається у дослідженні [3], перехід від локальних інфраструктур до хмарних рішень суттєво підвищує технологічні можливості організацій. Серед ключових переваг виділяють масштабованість, висока доступність завдяки розподіленим центрам обробки даних, централізоване управління.

Ці фактори роблять хмарні середовища ідеальною платформою для впровадження штучного інтелекту та машинного навчання, оскільки останні вимагають значних обчислювальних ресурсів та гнучкості в їх розподілі.

Дослідження [4] присвячене аналізу механізмів підвищення ефективності хмарних сервісів, зокрема: ізоляція трафіку (використання технологій VLAN, SDN та мікросегментації для запобігання міжсервісним атакам), балансування навантаження (застосування алгоритмів, наприклад, Round Robin, Least Connections для оптимального розподілу запитів), мінімізація затримок (розгортання CDN та Edge-обчислення). Ці рішення є критично важливими для забезпечення відмовостійкості та продуктивності хмарних систем, особливо під час масштабних міграцій або обробки даних у реальному часі.

В рамках роботи [5] запропоновано гібридну модель ухвалення рішень щодо хмарної міграції, яка дозволяє враховувати численні технічні, фінансові та безпекові фактори. Представлена методологія дозволяє організаціям систематизовано оцінювати доцільність і ризики перенесення ІТ-інфраструктури до хмари. Це дослідження сприяє формуванню стратегічного підходу до планування хмарних ініціатив, підвищуючи ефективність управлінських рішень.

Водночас українські дослідники [6–11] зосереджуються на прикладних аспектах хмарної міграції в державному секторі, зокрема на питаннях інформаційної безпеки та кадрових викликів. Вони вказують на необхідність адаптації політик доступу до нових умов експлуатації хмарних систем, а також на розробку механізмів контролю для збереження конфіденційності службової інформації в публічних хмарах. Окрім того, підкреслюється важливість підготовки фахівців, здатних ефективно працювати в умовах цифрової трансформації.

Загалом, наведені праці демонструють зростаючу складність проблем, що супроводжують процес переходу до хмари, і необхідність узагальнення кращих практик, а також формування універсальних рамкових підходів до управління цим процесом. Поряд із цим, спостерігається активна еволюція дослідницьких інтересів – від загальних переваг хмарних сервісів до глибокого аналізу ризиків, правового регулювання та методів валідації

ефективності хмарної міграції в конкретних галузях. Це свідчить про високий науковий та практичний потенціал даної тематики.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є визначення основних теоретичних засад хмарної міграції, зокрема виявлення ключових проблем, переваг і ризиків, що супроводжують процес переходу від традиційної локальної IT-інфраструктури до хмарних рішень. В рамках дослідження передбачається здійснити аналіз сучасних підходів до хмарної міграції, оцінити ефективність існуючих моделей і підходів, а також розробити рекомендації щодо забезпечення безпеки та надійності цього процесу.

Викладення основного матеріалу дослідження

На основі аналізу літературних джерел та сучасних наукових публікацій, у процесі вивчення теоретичних засад хмарної міграції доцільно виділити три ключові напрямки:

– недоліки традиційної локальної IT-інфраструктури;
– переваги впровадження хмарних технологій;
– проблематику безпечного перенесення даних і сервісів до хмари.

Ретельне вивчення кожного з цих аспектів дозволяє не лише об'єктивно оцінити доцільність міграції, а й визначити оптимальний шлях її реалізації з урахуванням специфіки бізнес-процесів, технічних обмежень та нормативних вимог. Саме узгоджене поєднання зазначених чинників, за умови мінімізації ризиків і максимізації переваг, формує основу для прийняття стратегічного рішення щодо хмарної трансформації.

1. Недоліки традиційної локальної інфраструктури.

Традиційна локальна IT-інфраструктура має низку суттєвих обмежень, які можна класифікувати за кількома критеріями, які потім застосувати для оптимізації:

Фінансові витрати: Висока вартість утримання, оновлення обладнання та ліцензій на програмне забезпечення. Організації змушені інвестувати у власні серверні приміщення, систему охолодження, резервне електроживлення та інші інженерні системи.

Обмежена масштабованість: Локальні системи потребують часу на розширення потужностей, що ускладнює оперативне реагування на зростання навантаження або зміни бізнес-потреб.

Залежність від фізичного середовища: Сервери потребують стабільного електропостачання, контролю температури та захисту від фізичних пошкоджень (пожежі, затоплення, крадіжки).

Технічне обслуговування: Необхідність постійного адміністрування, оновлення ПЗ, виправлення апаратних збоїв, що призводить до значних людських витрат.

Низький рівень автоматизації: Локальні системи часто потребують ручного втручання, тоді як хмарні технології пропонують інструменти DevOps, оркестрації та CI/CD.

Обмежена стійкість до катастроф: У разі аварії відновлення даних може зайняти дні або тижні, тоді як хмарні провайдери зазвичай пропонують георозподілені резервні копії та автоматичне відновлення.

Ці обмеження роблять традиційну інфраструктуру менш ефективною в умовах динамічного розвитку бізнесу, особливо для стартапів, компаній з сезонним навантаженням або глобальних проектів.

2. Переваги використання хмарних рішень.

Хмарні технології пропонують організаціям суттєві переваги, які можна структурувати таким чином:

Гнучкість і масштабованість. Миттєве збільшення або зменшення обчислювальних потужностей залежно від потреб. Можливість використання глобально розподілених датацентрів для покращення швидкодії сервісів.

Економічна ефективність. Оплата лише за фактично використані ресурси (модель pay-as-you-go). Відсутність необхідності капітальних витрат на обладнання.

Різноманітність сервісних моделей. IaaS (Infrastructure as a Service) – віртуальні сервери, мережеві ресурси, сховища даних. PaaS (Platform as a Service) – готові платформи для розробки та розгортання додатків. SaaS (Software as a Service) – готові програмні рішення (наприклад, CRM, ERP, офісні пакети).

Надійність і безпека. Автоматичне резервне копіювання та реплікація даних. Вбудовані механізми захисту від DDoS-атак, шифрування даних. Відповідність міжнародним стандартам (ISO 27001, SOC 2, GDPR).

Сучасні інструменти управління. Автоматизація DevOps-процесів (Kubernetes, Terraform, Ansible). Розширена аналітика та моніторинг (наприклад, AWS CloudWatch, Azure Monitor).

Завдяки цим перевагам хмарні технології стають оптимальним вибором для компаній, які прагнуть до цифрової трансформації, підвищення конкурентоспроможності та зменшення операційних витрат.

3. Проблематика безпечного перенесення даних і сервісів до хмари.

Хоча хмарні технології пропонують численні переваги, процес міграції супроводжується технічними, організаційними та правовими викликами:

Захист даних. Ризики під час передачі інформації через інтернет (перехоплення, MITM-атаки). Необхідність шифрування даних як під час передачі (in transit), так і під час зберігання (at rest).

Контроль доступу. Управління правами користувачів (IAM-політики, багатофакторна аутентифікація). Запобігання внутрішнім загрозам (наприклад, коли співробітники мають надмірні привілеї).

Відповідність нормативним вимогам. Дотримання GDPR, HIPAA, PCI DSS залежно від галузі. Юрисдикційні питання (де саме зберігаються дані та які закони застосовуються).

Сумісність і безперервність роботи. Інтеграція старих локальних систем із хмарними сервісами (API, мікросервісна архітектура). Мінімізація простоїв під час міграції (zero-downtime migration).

Управління ризиками. Проведення пентестів (penetration testing) для виявлення вразливостей. Налаштування систем моніторингу та реагування на інциденти.

Висновки

У статті розглянуто теоретичні засади хмарної міграції, окреслено недоліки традиційної IT-інфраструктури, переваги використання хмарних технологій, а також ідентифіковано проблематику безпечного перенесення даних. Перехід до хмари відкриває широкі можливості для оптимізації витрат та підвищення ефективності функціонування організацій, однак вимагає ретельного підходу до безпеки. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення ефективних стратегій безпечної міграції з урахуванням специфіки галузей і даних.

Список використаної літератури

1. Tan, K. L., Chi, C.-H., Lam, K.-Y. Survey on Digital Sovereignty and Identity: From Digitization to Digitalization. *ACM Computing Surveys*. 2023. Vol. 56(3), Article 61. DOI: https://doi.org/10.1145/3616400

2. Akinade A. O., Adepoju P. A., Ige A. B., Afolabi A. I. Cloud Security Challenges and Solutions: A Review of Current Best Practices. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*. 2025. Vol. 6, № 1. P. 26–35. DOI: https://doi.org/10.54660/.IJMRGE.2025.6.1.26-35

3. Ranjan A. From on-premise to cloud: Evolving IT infrastructure for the AI age. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2023. Vol. 20(3). P. 1898–1934. DOI: https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.20.3.1590

4. Zhang T., Zhang Q., Lei Y., Zou S. Load balancing with traffic isolation in data center networks. *Future Generation Computer Systems*. 2022. Vol. 127. P. 126–141. DOI: https://doi.org/10.1016/j.future.2021.09.002

5. Shirvani M. H., Amin G. R., Babaeikiadehi S. A decision framework for cloud migration: A hybrid approach. *IET Software*. 2022. Vol. 16(6) P. 603–629. DOI: https://doi.org/10.1049/sfw2.12072

6. Петренко О. С. Питання безпеки при хмарній міграції в органах публічної влади. *Інформаційні технології і безпека*. 2023. № 1(15). С. 45–53.

7. Коваленко І. М. Особливості впровадження хмарних сервісів у сфері публічного управління. *Державне управління: удосконалення та розвиток*. 2022. № 12. С. 17–25.

8. Кужда Т. І., Луциків І.В. Дослідження ролі та оцінювання перспектив розвитку хмарних сервісів у сфері публічного управління. *Трансформація бізнесу для сталого майбутнього: дослідження, цифровізація та інновації*: монографія / за ред. О. А. Сороківської. Тернопіль, 2024. С. 373–386.

9. Kovalenko O. Application of cloud technologies in constructing situation management systems. *Information technology and security*. 2015. Vol. 3. P. 11–18. DOI: https://doi.org/10.20535/2411-1031.2015.3.1.57679

10. Шевчук І., Депутат Б. Економічний аспект використання хмарних технологій у діяльності органів публічної влади та бізнес-структур. *Економіка та суспільство*. 2021. № 31. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-31-26

11. Глушенко Б. І. Перспективи розвитку та використання хмарних технологій державного сектору: кращі практики зарубіжного досвіду. *Інформація і право*. 2021. № 2(37). С. 39–45. DOI: https://doi.org/10.37750/2616-6798.2021.2(37).238334

References

1. Tan K. L., Chi C.-H., Lam K.-Y. (2023) Survey on Digital Sovereignty and Identity: From Digitization to Digitalization. *ACM Computing Surveys*, vol. 56(3), article 61. https://doi.org/10.1145/3616400

2. Akinade A. O., Adepoju P. A., Ige A. B., Afolabi A. I. (2025) Cloud Security Challenges and Solutions: A Review of Current Best Practices. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, vol. 6(1), no. 1, pp. 26–35. https://doi.org/10.54660/IJMRGE.2025.6.1.26-35

3. Ranjan A. (2023) From on-premise to cloud: Evolving IT infrastructure for the AI age. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 20(3), pp. 1898–1934. https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.20.3.1590

4. Zhang T., Zhang Q., Lei, Y., Zou S. (2022) Load balancing with traffic isolation in data center networks. *Future Generation Computer Systems*, vol. 127, pp. 126–141. https://doi.org/10.1016/j.future.2021.09.002

5. Shirvani M. H., Amin G. R., Babaeikiadehi S. (2022) A decision framework for cloud migration: A hybrid approach. *IET Software*, vol. 16(6), pp. 603–629. https://doi.org/10.1049/sfw2.12072

6. Petrenko O. S. (2023) Pytannja bezpeky pry khmarnij mighraciji v orghanakh publichnoji vlady [Security issues during cloud migration in public authorities]. *Informacijni tekhnologhiji i bezpeka* [Information technology and security], vol. 1(15), pp. 45–53.

7. Kovalenko I. M. (2022) Osoblyvosti vprovadzhennja khmarnykh servisiv u sferi publichnogho upravlinnja [Features of implementing cloud services in the field of public administration]. *Derzhavne upravlinnja: udoskonalennja ta rozvytok* [Public administration: improvement and development], vol. 12, pp. 17–25.

8. Kuzhda T. I., Lutsykiv I.V. (2024) Doslidzhennja roli ta ocinjuvannja perspektyv rozvytku khmarnykh servisiv u sferi publichnogho upravlinnja [Research on the role and assessment of the development prospects of cloud services in the field of public administration]. *Transformacija biznesu dlja stalogho majbutnjogho: doslidzhennja, cyfrovizacija ta innovaciji* [Business Transformation for a Sustainable Future: Research, Digitalization and Innovation]. Ternopil. pp. 373–386.

9. Kovalenko O. (2015) Application of cloud technologies in constructing situation management systems. *Information Technology and Security*, vol. 3, pp. 11–18. https://doi.org/10.20535/2411-1031.2015.3.1.57679

10. Shevchuk I, Deputat B. (2021) Ekonomichnyj aspekt vykorystannja khmarnykh tekhnologhij u dijaljnosti orghaniv publichnoji vlady ta biznes-struktur [Economic aspect of the use of cloud technologies in the activities of public authorities and business structures]. *Ekonomika ta suspiljstvo* [Economy and Society], vol. 31. https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-31-26

11. Hlushchenko B. (2021) Perspektyvy rozvytku ta vykorystannja khmarnykh tekhnologhij derzhavnogho sektoru: krashhi praktyky zarubizhnogho dosvidu [The prospects for development and use of public sector cloud technologies: Best practices of foreign experience]. *Informacija i pravo* [Information and Law], vol. 2(37), pp. 39–45. https://doi.org/10.37750/2616-6798.2021.2(37).238334

UDC 004.9:336.76 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.20

H. O. KOZUB
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-0406-0161

O. S. KORNIIENKO
Postgraduate Student at the Department of Software and Technologies
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0008-6234-784X

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR PERSONALIZING DISTANCE LEARNING FOR SOFTWARE ENGINEERING STUDENTS

This article explores the potential of artificial intelligence (AI) in personalizing the process of distance learning for students majoring in Software Engineering. The relevance of the topic is driven by the increasing demand for effective digital solutions that ensure the quality of education in remote formats, which has become especially important in the post-pandemic era. The author analyzes the key challenges of distance learning, including the lack of an individualized approach, low student engagement, and difficulties in mastering complex topics independently.

The paper examines practical aspects of implementing AI as a tool for adaptive learning, capable of providing personalized recommendations, explanations of educational material, automated knowledge assessment, and 24/7 support. Special attention is given to the practical experience of using a GPT-based chatbot in the teaching of the course "Fundamentals of Programming in C#". It was found that AI integration helps increase student motivation, accelerates the acquisition of complex concepts, and supports the development of self-directed learning skills. The results of surveys and observations demonstrate a positive impact of AI on the quality of learning outcomes.

In conclusion, the article substantiates the appropriateness of using artificial intelligence as a component of an adaptive model of distance learning in higher education institutions. The article may be useful for university instructors, educational platform developers, and professionals working on the modernization of digital educational infrastructure. The article also outlines directions for future research, including the development of ethical interaction frameworks between students and AI, the improvement of dynamic content adaptation mechanisms, and the creation of integrated solutions for various learning platforms tailored to the technical and cognitive needs of learners.

Key words: *artificial intelligence, distance learning, personalization, adaptive learning, software engineering, educational technologies.*

Н. О. КОЗУБ
кандидат технічних наук, доцент
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-0406-0161

О. С. КОРНІЄНКО
аспірант кафедри програмних засобів і технологій
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0008-6234-784X

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПЕРСОНАЛІЗАЦІЇ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ «ІНЖЕНЕРІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ»

Стаття присвячена дослідженню можливостей застосування штучного інтелекту (ШІ) для персоналізації процесу дистанційного навчання студентів спеціальності «Інженерія програмного забезпечення». Актуальність теми зумовлена зростанням потреби в ефективних цифрових рішеннях для забезпечення якості освіти в умовах віддаленого формату, що особливо актуально у післяпандемічний період. Автор аналізує ключові виклики дистанційного навчання, серед яких відсутність індивідуального підходу, низький рівень залученості студентів та труднощі з самостійним опрацюванням складних тем.

У статті розглянуто практичні аспекти впровадження ШІ як інструменту адаптивного навчання, здатного забезпечити персоналізовані рекомендації, пояснення навчального матеріалу, автоматизовану перевірку знань і підтримку в режимі 24/7. Особлива увага приділена практичному досвіду використання чат-бота на базі GPT у рамках викладання дисципліни «Основи програмування мовою C#». Встановлено, що інтеграція ШІ сприяє підвищенню мотивації студентів, пришвидшенню опанування складних тем та формуванню навичок самостій-

ного навчання. Результати опитувань і спостережень свідчать про позитивний вплив ШІ на якість засвоєння матеріалу.

У підсумку обґрунтовано доцільність використання штучного інтелекту як елемента адаптивної моделі дистанційного навчання у закладах вищої освіти. Стаття може бути корисною для викладачів, розробників освітніх платформ, а також фахівців, які працюють над модернізацією цифрової освітньої інфраструктури. Також визначено потенційні напрями подальших досліджень, серед яких – створення етичних моделей взаємодії між студентом та ШІ, удосконалення механізмів адаптації навчального контенту відповідно до динаміки навчання, а також розробка інтегрованих рішень для різних освітніх платформ з урахуванням технічних і когнітивних потреб здобувачів освіти.

Ключові слова: *штучний інтелект, дистанційне навчання, персоналізація, адаптивне навчання, інженерія програмного забезпечення, освітні технології.*

Problem statement

In today's rapidly evolving digital landscape, distance learning has become an integral part of the educational process, particularly in higher technical education. This format provides flexible opportunities for mastering material but also introduces new challenges for both instructors and students. A key issue in this context is the need to individualize educational content according to each student's knowledge level, learning pace, and personal needs.

Artificial intelligence (AI) plays a pivotal role in the digital transformation of education by enabling personalized learning approaches [1]. AI tools make it possible to tailor learning platforms to individual user characteristics, automate feedback, monitor performance, and create customized learning paths.

Formulation of the purpose of the study

The goal of this study is to examine how artificial intelligence tools can be employed to personalize distance education for Software Engineering students, and to identify the benefits, limitations, and future prospects of this approach.

Despite the advantages of distance learning, there remain several challenges associated with traditional online education formats. These include a lack of individualization, decreased student motivation, ineffective feedback loops, and instructor overload due to repetitive tasks. Such issues limit the overall effectiveness of the learning process and necessitate the adoption of innovative, technology-driven solutions [6].

Presentation of the main material of the study

Personalized learning is an approach that tailors the educational process to the individual characteristics, needs, and goals of each student. Within the context of traditional or even standard distance education, implementing this approach poses significant challenges due to limited resources and the need for manual analysis of large volumes of data. As a result, the use of artificial intelligence (AI) tools is gaining increasing importance.

AI in education encompasses various directions, including:

1) adaptive learning systems that modify content delivery based on the student's progress;
2) intelligent tutoring systems that offer support through explanations, hints, and feedback;
3) analytical tools that identify learning gaps and performance trends;
4) recommendation engines that suggest learning materials or tasks based on the student's prior activity.

One of the most widely studied concepts in this field is adaptive learning – a methodology that dynamically adjusts the content, format, and pace of learning according to real-time user data. Modern platforms such as Coursera, Khan Academy, and Smart Sparrow implement adaptive learning using machine learning algorithms [2].

For students majoring in Software Engineering, who work with logic-based systems, algorithms, and modeling technologies, the integration of AI into the learning process provides dual benefits [11]. On one hand, they receive more effective and tailored instruction; on the other, they gain direct exposure to the methods they may later apply in their professional practice [4, 7].

Furthermore, the development of large language models (LLMs) such as GPT has introduced the potential for digital assistants that can answer student queries, review code, generate illustrative examples, and even simulate the logic of real-world IT projects. This fundamentally transforms the educational environment and redefines the role of the instructor.

Application of AI in learning personalization

Modern artificial intelligence technologies are increasingly integrated into the educational process, enabling the creation of adaptive and individualized learning environments. For students in Software Engineering, who often vary in their levels of prior knowledge, motivation, and learning pace, the personalization of educational content is particularly valuable.

Intelligent Tutoring Systems. Intelligent instructional agents (e.g., based on large language models such as ChatGPT or Claude) are capable of:

1) answering student questions in real time, 24/7;
2) providing explanations in programming, algorithms, and design patterns;
3) analyzing code snippets and suggesting corrections;
4) generating personalized tasks based on the student's level of proficiency.

These capabilities partially automate the support function typically carried out by instructors or teaching assistants, especially in large-scale courses [3].

Adaptive Learning Platforms. AI-powered systems such as:

1) Knewton – adjusts content to match the student's knowledge level and identifies knowledge gaps;
2) Smart Sparrow – enables nonlinear learning paths;
3) Realizeit – analyzes student activity and optimizes topic sequencing, allow the construction of personalized learning trajectories that dynamically adapt as the learner progresses.

Recommendation Systems. Similar to how platforms like YouTube or Spotify suggest content based on user preferences, AI in education can recommend:

1) articles, videos, or code examples aligned with topics the student has not yet mastered;
2) quizzes or assignments tailored to the appropriate difficulty level;
3) practical projects aligned with the student's interests.

This increases motivation and engagement, particularly when students feel they are receiving content that is directly relevant to their individual needs.

Learning Analytics. Through machine learning, platforms can:

1) detect behavioral patterns among students;
2) predict risks of academic underperformance;
3) automatically notify instructors of students requiring intervention;
4) generate weekly or daily dashboards showing each student's progress [5].

These features not only improve personalized learning experiences but also strengthen academic supervision and mentoring functions.

Challenges and limitations of AI implementation in education

Despite numerous advantages, the integration of artificial intelligence into the educational process is accompanied by a range of challenges and risks. These must be carefully considered when planning the digital transformation of learning environments, particularly in the context of higher technical education.

Ethical and pedagogical risks. One of the key concerns involves the ethical use of AI. Students may misuse intelligent agents to complete assignments without genuine learning or engagement. This raises the need to rethink assessment methods for both knowledge and practical competencies.

Additionally, the role of the educator remains uncertain: should the instructor function solely as a mentor and coordinator, or continue to serve as the primary source of knowledge? A new pedagogical interaction model must be established – one in which AI supplements, rather than replaces, the human teacher.

Technical limitations. Not all AI tools are:

1) capable of providing stable and accurate responses to highly specialized queries;
2) equipped with Ukrainian language support or access to localized content;
3) areely available or affordable for educational institutions.

Further challenges may arise in integrating AI systems into existing learning management systems (LMS), such as Moodle, Google Classroom, or Canvas.

Data privacy and protection. The use of AI in education requires processing large volumes of personal student data, including browsing history, responses, progress metrics, and behavioral patterns. This raises concerns about:

1) compliance with GDPR or national data protection regulations;
2) security of information stored in cloud-based services;
3) transparency of decision-making algorithms used to personalize learning paths.

Psychological adaptation of students and instructors. The transition to AI-enhanced education can cause stress and resistance among both students and educators. Adaptation periods, targeted training sessions, and gradual implementation strategies are necessary to facilitate successful adoption – requiring time, planning, and institutional support.

Practical recommendations

Based on the conducted analysis, several recommendations can be proposed for instructors, curriculum developers, and university administrators aiming to effectively integrate artificial intelligence tools into the distance learning process for future software engineers:

Gradual Integration of AI into the Learning Process. Implementation should begin with auxiliary services such as code checking tools, example generators, and chatbots, with progressive expansion toward more advanced applications like adaptive learning systems and intelligent tutoring agents.

Enhancing Digital Competence of Educators. It is essential to organize professional development programs focused on working with large language models (LLMs), adaptive platforms, and educational analytics systems to ensure that instructors are well-equipped to use these technologies.

Development of Ethical Guidelines for AI Use in Education. Institutions should establish academic integrity policies that reflect the new challenges associated with AI usage. These should include mechanisms for detecting inappropriate use and promoting responsible engagement with intelligent systems.

Content Personalization Through Data Analytics. Educators should leverage analytical tools to segment students based on their learning styles, knowledge levels, and learning pace. This segmentation enables the creation of personalized learning paths tailored to individual needs.

Evaluation and Assessment of Effectiveness

The integration of AI should be accompanied by ongoing evaluation of its impact, including improvements in academic performance, student engagement, and time efficiency for educators.

Instructor's practical experience. During the remote delivery of the course «Fundamentals of Programming in C#» for Software Engineering students, artificial intelligence was integrated as an auxiliary tool within the learning process. Specifically, students were encouraged to utilize a GPT-4-based chatbot to independently explore course topics, receive code examples, clarify object-oriented programming principles, and debug their programs [9]. The chatbot acted as a virtual tutor, providing adaptive explanations based on user queries. Additionally, students were able to critically analyze the AI-generated code, correct mistakes, and discuss alternative implementations. The use of AI proved especially effective during laboratory assignments, where students often consulted the bot for guidance on syntax and logic issues, thereby avoiding lengthy internet searches. A comparative evaluation conducted within the course revealed that students who actively used the AI assistant were 15–20 % more likely to pass tests on the first attempt. Furthermore, a student survey indicated that 84 % found the integration of AI beneficial to their learning, and 67 % reported a deeper understanding of complex topics. These results highlight the value of systematically integrating AI not merely as a reference tool but as a pedagogical mentor within adaptive learning environments

Conclusions

Artificial intelligence unlocks new opportunities for personalized distance education, which is particularly relevant for training software engineering students. AI technologies enable consideration of individual learner characteristics, offer continuous feedback, adapt content delivery, and automate routine instructional tasks [10].

However, effective implementation of such solutions requires thorough planning, instructor training, adherence to ethical standards, and awareness of technical and organizational limitations. The successful integration of AI into educational environments contributes to improving learning quality, fostering digital literacy [8], and enhancing the competitiveness of graduates in the information technology sector.

Bibliography

1. Holmes W., Bialik M., Fadel C. Artificial Intelligence in Education: Promises and Implications for Teaching and Learning. Center for Curriculum Redesign, 2019.
2. Luckin R., Holmes W., Griffiths M., Forcier L. B. Intelligence Unleashed: An Argument for AI in Education. Pearson, 2016.
3. Woolf B. P. Building Intelligent Interactive Tutors: Student-Centered Strategies for Revolutionizing E-Learning. Morgan Kaufmann, 2010.
4. Nkambou R., Bourdeau J., Mizoguchi R. Advances in Intelligent Tutoring Systems. Springer, 2010.
5. Wang Y., Heffernan N. The "assistance" Model: Leveraging How Students Use Hints to Provide Personalized Tutoring. In Intelligent Tutoring Systems, 2012.
6. Пугач В. Штучний інтелект як інструмент підвищення ефективності дистанційного навчання. *Педагогіка безпеки*. 2024. № 9(1). С. 31–36.
7. Гордієнко О., Коваль А. Майбутнє програмування: як штучний інтелект змінює розробку програмного забезпечення. *Інформаційні технології та суспільство*. 2024. № 4. С. 7–12.
8. Годецька Т. Штучний інтелект як ефективна технологія інформаційно-аналітичного супроводу цифрової трансформації освіти. *Науково-педагогічні студії*. 2024. № 8. С. 200–216.
9. Кім А., Алєксєєва Г., Хоменко В., Несторенко О., Матвійчук-Юдіна О. Інтеграція штучного інтелекту в процес онлайн-навчання. *Молодь і ринок*. 2023. № 12(215). С. 45–50.
10. Бахмат Н. В. Штучний інтелект у вищій освіті: можливості використання. *Педагогічна освіта: теорія і практика*. 2023. № 35. С. 161–173.
11. Луганська В. Штучний інтелект у викладанні та навчанні. *Цифрова трансформація освіти та науки : матеріали II Всеукр. наук.-практ. конф*., м. Харків, 2024. Харків, 2024. С. 147–151.
12. Вітрук Р. О. Штучний інтелект як засіб навчання в закладах професійної (професійно-технічної) освіти: кваліфікаційна робота магістра. Хмельницький: Хмельницький нац. ун-т, 2024. 72 с.
13. Нікітіна Л., Дженюк Н., Борисова Л. ІТ та технології штучного інтелекту у підготовці інженерів з телекомунікацій. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2023. № 3(71). С. 189–195.

References

1. Holmes, W., Bialik, M., & Fadel, C. (2019). Artificial Intelligence in Education: Promises and Implications for Teaching and Learning. Center for Curriculum Redesign.
2. Luckin, R. et al. (2016). Intelligence Unleashed: An Argument for AI in Education. Pearson.
3. Woolf, B. P. (2010). Building Intelligent Interactive Tutors: Student-Centered Strategies for Revolutionizing E-Learning. Morgan Kaufmann.
4. Nkambou, R., Bourdeau, J., & Mizoguchi, R. (2010). Advances in Intelligent Tutoring Systems. Springer.
5. Wang, Y., & Heffernan, N. (2012). The "assistance" Model: Leveraging How Students Use Hints to Provide Personalized Tutoring. In Intelligent Tutoring Systems.
6. Puhach, V. (2024). Shtuchnyi intelekt yak instrument pidvyshchennia efektyvnosti dystantsiinoho navchannia [Artificial intelligence as a tool for enhancing the effectiveness of distance education]. *Pedagogika bezpeky – Pedagogics of Safety*, 9(1), 31–36.
7. Hordiienko, O., & Koval, A. (2024). Maibutnie prohramuvannia: yak shtuchnyi intelekt zminiuiie rozrobku prohramnoho zabezpechennia [The future of programming: how artificial intelligence changes software development]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information Technology and Society*, (4), 7–12.
8. Hodetska, T. (2024). Shtuchnyi intelekt yak efektyvna tekhnolohiia informatsiino-analitychnoho suprovodu tsyfrovoyi transformatsii osvity [Artificial intelligence as an effective technology for the information-analytical support of education's digital transformation]. *Naukovo-pedahohichni studii – Scientific and Pedagogical Studies*, (8), 200–216.
9. Kim, A., Alekseeva, H., Khomenko, V., Nestorenko, O., & Matviichuk-Yudina, O. (2023). Intehratsiia shtuchnoho intelektu v protses onlain-navchannia [Integration of artificial intelligence into the online learning process]. *Molod i rynok – Youth and the Market*, 12(215), 45–50.
10. Bakhmat, N. V. (2023). Shtuchnyi intelekt u vyshchii osviti: mozhlyvosti vykorystannia [Artificial intelligence in higher education: Opportunities for implementation]. *Pedahohichna osvita: teoriia i praktyka – Pedagogical Education: Theory and Practice*, (35), 161–173.
11. Luhanska, V. (2024). Shtuchnyi intelekt u vykladanni ta navchanni [Artificial intelligence in teaching and learning]. In *Tsyfrova transformatsiia osvity ta nauky: materialy II Vseukr. nauk.-prakt. konf., Kharkiv* (pp. 147–151).
12. Vitruck, R. O. (2024). Shtuchnyi intelekt yak zasib navchannia v zakladakh profesiinoi (prodesiino-tekhnichnoi) osvity [Artificial intelligence as a learning tool in vocational education institutions]. (Master's qualification work). Khmelnytskyi National University.
13. Nikitina, L., Dzheniuk, N., & Borysova, L. (2023). IT ta tekhnolohii shtuchnoho intelektu u pidhotovtsi inzheneriv z telekomunikatsii [IT and artificial intelligence technologies in the training of telecommunications engineers]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku – Systems of Control, Navigation and Communication*, 3(71), 189–195.

УДК 004.738.5+004.4’42 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.21

Г. О. КОЗУБ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інформаційних технологій та систем
Навчально-науковий інститут математики та інформаційних технологій
ДЗ «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка»
ORCID: 0000-0001-5387-050X

Ю. Ю. СУРМА
викладач фахового коледжу УКД,
керівник відділу автоматизації та електронного тестування
Університет Короля Данила
ORCID: 0009-0006-3308-7984

О. І. АРТЕМЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри комп’ютерних систем і технологій
Приватний вищий навчальний заклад «Буковинський університет»
ORCID: 0000-0002-4057-1217

РОЛЬ ВЕБКОМПОНЕНТІВ У ПОБУДОВІ СУЧАСНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ: ПЕРЕВАГИ ТА ОБМЕЖЕННЯ

Мета статті. Метою статті є дослідження впливу вебкомпонентів на створення сучасних веб-інтерфейсів, аналіз їхньої ролі в забезпеченні модульності, сумісності, продуктивності, доступності та тестовності в контексті життєвого циклу програмного забезпечення (ПЗ). Стаття також спрямована на розробку стратегій подолання обмежень, пов’язаних із впровадженням вебкомпонентів, для підвищення якості веб-додатків.

Наукова новизна. Стаття поглиблює розуміння ролі вебкомпонентів, базуючись на стандартах W3C, у забезпеченні функціональних і нефункціональних вимог веб-розробки. Новизна полягає в систематизації підходів до інтеграції вебкомпонентів із сучасними фреймворками (React, Angular, Vue.js), аналізі їхнього впливу на всі етапи життєвого циклу ПЗ та розробці практичних рекомендацій для подолання викликів, таких як складність тестування Shadow DOM, оптимізація продуктивності через WebAssembly і забезпечення доступності за стандартами WCAG. Особливу увагу приділено недостатньо дослідженим аспектам, зокрема інтеграції з DevOps-практиками та автоматизованим тестуванням.

Результати. Дослідження показало, що вебкомпоненти, використовуючи Custom Elements, Shadow DOM, HTML Templates та ES Modules, сприяють створенню модульних і масштабованих інтерфейсів, зменшуючи складність проєктування та розробки. Вони забезпечують ізоляцію стилів і логіки, що запобігає конфліктам у великих проєктах, та сумісність із різними фреймворками, полегшуючи інтеграцію. На етапі тестування вебкомпоненти спрощують модульне тестування, але ускладнюють юніт-тестування через Shadow DOM, що вимагає спеціалізованих інструментів, таких як Playwright чи Testing Library. Продуктивність залежить від оптимізації рендерингу, де WebAssembly і модульний рендеринг зменшують затримки. Доступність потребує використання ARIA-атрибутів і семантичного HTML, а SEO – серверного рендерингу (SSR) чи статичної генерації (SSG). Порівняльний аналіз показав переваги вебкомпонентів у модульності та повторному використанні порівняно з традиційними підходами, але виявив необхідність додаткових зусиль для тестування та доступності.

Висновки. Вебкомпоненти є ефективним інструментом для побудови сучасних веб-інтерфейсів, забезпечуючи модульність, інкапсуляцію та сумісність. Вони спрощують розробку, розгортання та підтримку ПЗ, але потребують ретельного підходу до тестування, продуктивності та доступності. Запропоновані стратегії, такі як використання WebAssembly, автоматизованих інструментів тестування (Playwright, axe-core) і SSR для SEO, дозволяють долати обмеження. У 2025 році вебкомпоненти залишаються актуальними, інтегруючись із новими технологіями, такими як Web 3.0 та AI, що відкриває перспективи для їхнього подальшого розвитку.

Ключові слова: *життєвий цикл ПЗ, функціональні та нефункціональні вимоги, тестування.*

H. O. KOZUB
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Information Technology
and Systems
Educational and Scientific Institute of Mathematics and Information Technologies
of Luhansk Taras Shevchenko National University
ORCID: 0000-0001-5387-050X

YU. YU. SURMA
Lecturer at the Vocational College of Ukraine,
Head of the Automation and Electronic Testing Department
King Danylo University
ORCID: 0009-0006-3308-7984

O. I. ARTEMENKO
PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Computer Systems and Technologies Department
Private Higher Educational Institution "Bukovynian University"
ORCID: 0000-0002-4057-1217

THE ROLE OF WEB COMPONENTS IN BUILDING MODERN INTERFACES: ADVANTAGES AND LIMITATIONS

The purpose of the article. The purpose of the article is to study the impact of web components on the creation of modern web interfaces, to analyze their role in ensuring modularity, compatibility, performance, availability and testability in the context of the software life cycle. The article also aims to develop strategies for overcoming the limitations associated with the implementation of web components to improve the quality of web applications.

Scientific novelty. The article deepens the understanding of the role of web components based on W3C standards in meeting the functional and non-functional requirements of web development. The novelty lies in systematizing approaches to integrating web components with modern frameworks (React, Angular, Vue.js), analyzing their impact on all stages of the software life cycle, and developing practical recommendations for overcoming challenges such as the complexity of Shadow DOM testing, performance optimization through WebAssembly, and ensuring accessibility according to WCAG standards. Particular attention is paid to under-researched aspects, such as integration with DevOps practices and automated testing.

Results. The study found that web components using Custom Elements, Shadow DOM, HTML Templates, and ES Modules help create modular and scalable interfaces, reducing design and development complexity. They provide isolation of styles and logic to prevent conflicts in large projects and compatibility with different frameworks, making integration easier. At the testing stage, web components simplify unit testing, but complicate unit testing due to the Shadow DOM, which requires specialized tools such as Playwright or Testing Library. Performance depends on rendering optimization, where WebAssembly and modular rendering reduce latency. Accessibility requires the use of ARIA attributes and semantic HTML, and SEO requires server-side rendering (SSR) or static generation (SSG). The comparative analysis showed the advantages of web components in modularity and reusability compared to traditional approaches but revealed the need for additional efforts for testing and accessibility.

Conclusions. Web components are an effective tool for building modern web interfaces, providing modularity, encapsulation, and compatibility. They simplify software development, deployment, and support, but require a careful approach to testing, performance, and availability. The proposed strategies, such as the use of WebAssembly, automated testing tools (Playwright, axe-core), and SSR for SEO, allow overcoming the limitations. In 2025, web components remain relevant, integrating with new technologies such as Web 3.0 and AI, which opens prospects for their further development.

Key words: *software life cycle, functional and non-functional requirements, testing.*

Постановка проблеми

Сучасна веб-розробка зіштовхується із завданнями створення модульних, гнучких і масштабованих інтерфейсів, які відповідають зростаючій складності веб-додатків. Необхідність інтеграції з різними платформами, швидкого оновлення програмного забезпечення (ПЗ) та забезпечення високої якості користувацького досвіду підкреслюють важливість технологій, що сприяють повторному використанню коду, інкапсуляції та сумісності. Вебкомпоненти, засновані на стандартах W3C, таких як Custom Elements, Shadow DOM, HTML Templates і ES Modules, пропонують рішення для цих викликів, спрощуючи етапи життєвого циклу ПЗ, включаючи проєктування, розробку, тестування, розгортання та підтримку. Проте впровадження вебкомпонентів пов'язане з обмеженнями, такими як складність автоматизованого тестування, забезпечення продуктивності, відповідність стандартам доступності та підтримка застарілих браузерів. У контексті життєвого циклу ПЗ виникає потреба в детальному аналізі ролі вебкомпонентів у забезпеченні функціональних і нефункціональних вимог, зокрема модульності, продуктивності, доступності та тестовності, для створення ефективних і якісних веб-інтерфейсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження у сфері веб-розробки підкреслюють значення вебкомпонентів для створення модульних і масштабованих інтерфейсів. Козуб Г. О., Козуб Ю. Г. [1] акцентують на декларативному підході до розробки мультиплатформних додатків, де вебкомпоненти сприяють модульності шляхом створення ізольованих елементів інтерфейсу, що спрощує проєктування та інтеграцію на етапі розробки. Gorai S. K. [2] аналізує бар'єри веб-розробки, зокрема складність інкапсуляції, і зазначає, що Shadow DOM у вебкомпонентах вирішує проблеми конфліктів стилів

і скриптів, але вимагає додаткових зусиль для SEO через динамічний контент. Maulana I. [3] досліджує доступність веб-інтерфейсів, наголошуючи, що вебкомпоненти потребують ретельного впровадження ARIA-атрибутів і семантичного HTML для відповідності стандартам WCAG, особливо для користувачів із порушеннями зору, що є ключовим нефункціональним вимогам. Tripathi M. та ін. [4] розглядають вебкомпоненти в контексті фреймворків, підкреслюючи їхню агностичність до технологій, що дозволяє інтеграцію з React, Angular чи Vue.js, сприяючи сумісності на етапі розробки та розгортання. Attri V. K. та ін. [5] вказують на складність освоєння вебкомпонентів розробниками, зокрема через необхідність розуміння стандартів W3C і тестування Shadow DOM, що ускладнює етап тестування життєвого циклу ПЗ. Shah H. [6] акцентує на ролі HTML5 Customized Built-in Elements у вдосконаленні компонентно-орієнтованої розробки, що сприяє повторному використанню коду та спрощує підтримку. Gu Y. [7] досліджує оптимізацію продуктивності фронтенду через модульний рендеринг і адаптивну гідратацію, які зменшують затримки рендерингу вебкомпонентів, що є критичним для нефункціональної вимоги продуктивності. Visconti E. та ін. [8] аналізують автоматизований моніторинг веб-інтерфейсів, пропонуючи інструменти для тестування вебкомпонентів, що підвищують надійність на етапі тестування. Monteiro M. та ін. [9] досліджують інтеграцію вебкомпонентів із no-code платформами, що спрощує розгортання та підтримку додатків, сприяючи автоматизації життєвого циклу ПЗ. Rao N. S. [10] підкреслює роль WebAssembly у підвищенні продуктивності вебкомпонентів шляхом прискорення ресурсоємних операцій, таких як рендеринг анімацій, що доповнює їхню модульність. Водночас питання ефективного тестування Shadow DOM, інтеграції з DevOps-практиками та забезпечення нефункціональних вимог, таких як продуктивність і доступність, залишаються недостатньо дослідженими, що визначає актуальність цього аналізу.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є аналіз ролі вебкомпонентів у побудові сучасних веб-інтерфейсів з акцентом на їхній вплив на життєвий цикл ПЗ, виконання функціональних (модульність, сумісність) і нефункціональних вимог (продуктивність, доступність, тестованість) та розробка стратегій подолання обмежень для забезпечення якості веб-додатків.

Викладення основного матеріалу дослідження

Вебкомпоненти, як технологія, заснована на стандартах W3C, включають Custom Elements для створення власних HTML-тегів із кастомною логікою, Shadow DOM для інкапсуляції стилів і поведінки, HTML Templates для визначення повторно використовуваних фрагментів розмітки та ES Modules для стандартизації імпорту JavaScript-коду [1, 4]. Ці технології дозволяють створювати ізольовані, модульні елементи інтерфейсу, які спрощують життєвий цикл ПЗ. На етапі проєктування вебкомпоненти сприяють формуванню компонентно-орієнтованої архітектури, де кожен елемент інтерфейсу, наприклад кнопка чи форма, чітко відповідає визначеним функціональним вимогам, що зменшує складність проєктування великих систем [6]. У процесі розробки модульність і повторне використання скорочують обсяг коду, оскільки компоненти, такі як віджети чи навігаційні панелі, можуть бути використані в різних частинах додатка чи навіть у різних проєктах [1, 4]. Інкапсуляція через Shadow DOM ізолює стилі та скрипти компонента від глобального контексту, запобігаючи конфліктам у CSS чи JavaScript, що особливо важливо в проєктах із розподіленими командами [2, 6]. Сумісність вебкомпонентів із фреймворками, такими як React, Angular чи Vue.js, забезпечує гнучкість вибору технологій, дозволяючи інтегрувати їх у гетерогенні системи без значних модифікацій [4, 7]. Наприклад, вебкомпонент може бути імпортований у React-додаток через обгортку, що використовує ref для доступу до методів компонента, забезпечуючи безшовну інтеграцію [7].

На етапі тестування вебкомпоненти створюють як переваги, так і виклики. Ізольованість компонентів спрощує модульне тестування, оскільки кожен компонент можна тестувати незалежно від інших частин додатка [8]. Проте Shadow DOM ускладнює доступ до внутрішньої структури компонента під час юніт-тестування, що вимагає використання спеціалізованих інструментів, таких як Testing Library або Playwright, які дозволяють проникати в Shadow DOM через API, наприклад, shadowRoot.querySelector [5, 8]. Автоматизоване тестування в CI/CD-пайплайнах, наприклад із використанням GitHub Actions чи Jenkins, може включати Puppeteer для симуляції взаємодії користувача з компонентами, що підвищує надійність тестів, але збільшує витрати часу на їх налаштування [8]. Для функціонального тестування критично важливо перевіряти відповідність компонентів специфікаціям, наприклад, чи коректно відображається форма з валідатором у різних браузерах [4]. Нефункціональні вимоги, такі як продуктивність, також потребують уваги. Неефективна організація вебкомпонентів, наприклад надмірне вкладення Shadow DOM, може призвести до затримок під час клієнтської гідратації, особливо в додатках із великою кількістю динамічного контенту [7]. Для оптимізації продуктивності пропонується використовувати модульний рендеринг, який розбиває рендеринг на менші асинхронні завдання, або інтеграцію з WebAssembly для прискорення обчислень у браузері [10]. Наприклад, WebAssembly може бути використаний для обробки складних операцій у компонентах, таких як рендеринг графіків чи анімацій, що зменшує навантаження на JavaScript-движок [10].

Доступність є ще однією нефункціональною вимогою, яка потребує ретельного підходу. Вебкомпоненти повинні відповідати стандартам WCAG, включаючи використання ARIA-атрибутів (наприклад, aria-label, aria-hidden) і семантичного HTML для забезпечення сумісності з допоміжними технологіями, такими як екранні читачі [3].

Наприклад, компонент навігаційної панелі має містити атрибути role=»navigation» і aria-label для чіткого позначення його призначення. Недостатня увага до доступності може призвести до виключення користувачів із порушеннями зору чи моторики [3]. Щодо SEO, динамічний контент, створений вебкомпонентами, може ускладнювати індексацію пошуковими системами, якщо не використовується серверний рендеринг (SSR) або статична генерація сайту (SSG) [2]. Наприклад, фреймворки, такі як Next.js, дозволяють генерувати статичний HTML для вебкомпонентів, що покращує SEO [7]. Підтримка застарілих браузерів, таких як Internet Explorer, вимагає використання поліфілів, наприклад @webcomponents/webcomponentsjs, що додає накладні витрати на продуктивність і ускладнює розгортання [5]. На етапі розгортання стандартизація вебкомпонентів полегшує інтеграцію в CI/CD-пайплайни, оскільки компоненти є автономними модулями, які можна окремо оновлювати чи масштабувати [9]. На етапі підтримки модульність вебкомпонентів спрощує внесення змін, наприклад оновлення стилів чи логіки компонента без впливу на інші частини додатка [4].

Для наочної оцінки переваг і обмежень вебкомпонентів порівняно з традиційними підходами до розробки інтерфейсів, такими як монолітні фреймворки чи бібліотеки без стандартизації, нижче наведено таблицю, яка аналізує ключові критерії. Таблиця 1 ілюструє, як вебкомпоненти відповідають функціональним і нефункціональним вимогам, включаючи модульність, тестованість і продуктивність.

Таблиця 1

Порівняння вебкомпонентів і традиційних підходів до розробки інтерфейсів

Критерій	Вебкомпоненти	Традиційні підходи
Модульність	Висока (інкапсуляція через Shadow DOM)	Середня (залежить від фреймворку)
Повторне використання	Високе (незалежність від фреймворків)	Обмежене (залежить від архітектури)
Тестування	Складне (Shadow DOM вимагає спеціалізованих інструментів)	Простіше (стандартні інструменти)
Продуктивність	Залежить від оптимізації (можливі затримки через гідратацію)	Залежить від фреймворку
Доступність	Вимагає додаткових зусиль (ARIA), семантичного HTML	Залежить від реалізації

Таблиця 1 демонструє, що вебкомпоненти переважають за модульністю та повторним використанням завдяки стандартам W3C, але потребують додаткових зусиль для тестування та забезпечення доступності. Традиційні підходи, такі як використання React без вебкомпонентів, можуть бути простішими в тестуванні, але менш гнучкими в інтеграції з іншими технологіями.

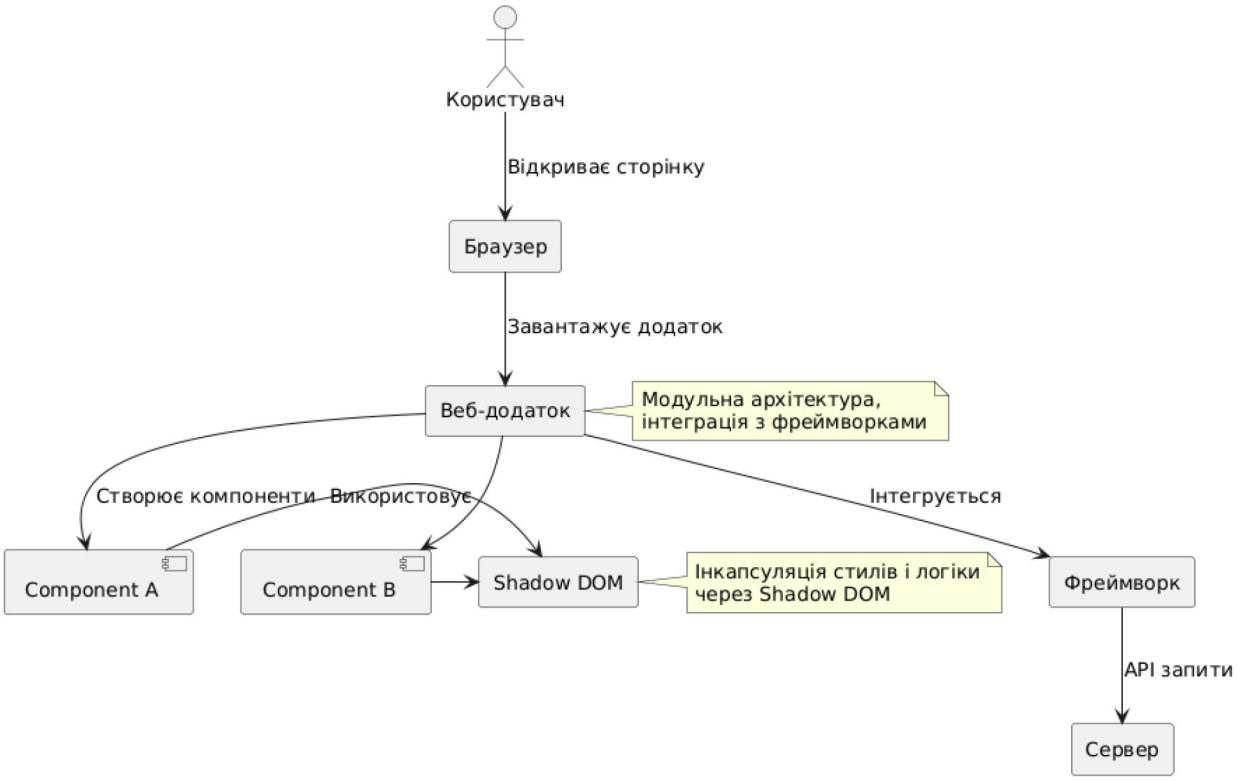


Рис. 1. Архітектура веб-додатка з використанням вебкомпонентів

Джерело: авторська розробка в PlantUML online editor

Для ілюстрації взаємодії вебкомпонентів у структурі веб-додатка нижче наведено діаграму, створену за допомогою PlantUML. Діаграма відображає, як користувач взаємодіє з браузером, який обробляє веб-додаток, що містить вебкомпоненти з ізольованими Shadow DOM. Компоненти інтегруються з фреймворком, який взаємодіє з сервером для рендерингу чи отримання даних, підкреслюючи модульність і інкапсуляцію.

Рисунок 1 підкреслює ізольованість вебкомпонентів через Shadow DOM, що забезпечує незалежність стилів і логіки, а також їхню інтеграцію з фреймворками та сервером. Наприклад, ComponentA може бути кнопкою з власним стилем у Shadow DOM, яка викликає API-запит через фреймворк, не впливаючи на ComponentB, що демонструє модульність.

Стратегії подолання обмежень вебкомпонентів включають технічні підходи до забезпечення якості. Для тестування рекомендується використовувати інструменти, такі як Playwright або Testing Library, які дозволяють взаємодіяти з Shadow DOM через методи, як shadowRoot.querySelector, а також інтегрувати тести в CI/CD-пайплайни для автоматизації [8]. Для підвищення продуктивності пропонується застосовувати модульний рендеринг, який розбиває рендеринг на асинхронні завдання, або WebAssembly для обробки ресурсоємних операцій, таких як рендеринг анімацій [7, 10]. Доступність забезпечується впровадженням ARIA-атрибутів і семантичного HTML на етапі проєктування, а також використанням автоматизованих інструментів, таких як axe-core, для перевірки відповідності WCAG [3]. Для SEO рекомендується застосовувати SSR або SSG, наприклад через фреймворк Next.js, що генерує статичний HTML для компонентів [7]. Підтримка застарілих браузерів досягається за допомогою поліфілів, таких як @webcomponents/webcomponentsjs, хоча це може знизити продуктивність [5].

Висновки

Вебкомпоненти є ключовою технологією для побудови сучасних веб-інтерфейсів, забезпечуючи модульність, інкапсуляцію та сумісність із різними фреймворками. Вони спрощують життєвий цикл ПЗ, зменшуючи обсяг коду на етапі розробки, полегшуючи оновлення на етапі підтримки та сприяючи стандартизації на етапі розгортання. Основні переваги включають повторне використання компонентів, ізоляцію стилів і логіки через Shadow DOM, а також агностичність до технологій. Обмеження, такі як складність тестування Shadow DOM, проблеми з продуктивністю через неефективну гідратацію, вимоги до доступності та підтримка застарілих браузерів, потребують ретельного планування. Стратегії подолання цих обмежень включають використання спеціалізованих інструментів тестування, оптимізацію продуктивності через модульний рендеринг і WebAssembly, впровадження стандартів WCAG для доступності та SSR для SEO. У 2025 році вебкомпоненти продовжують еволюціонувати, інтегруючись із WebAssembly і автоматизованими інструментами моніторингу, що забезпечує їхню адаптивність до нових вимог веб-розробки, включаючи інтеграцію з Web 3.0 і AI-технологіями.

Список використаної літератури

1. Козуб Г. О., Козуб Ю. Г. Декларативний підхід при створенні мультиплатформних додатків. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. № 5(275). 2022. С. 10–15. DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-275-5-10-15

2. Gorai S. K. Web Development Barriers and Challenges // International journal of scientific research in engineering and management. 2025. Vol. 09, iss. 01. P. 1–9. DOI: https://doi.org/10.55041/ijsrem40734 URL: https://ijsrem.com/download/web-development-barriers-and-challenges/

3. Maulana I. Web Accessibility: Designing User-Friendly Websites for Individuals with Visual Impairments // Golden Ratio of Data in Summary. 2025. Vol. 5, iss. 1. P. 14–19. DOI: https://doi.org/10.52970/grdis.v5i1.896 URL: https://goldenratio.id/index.php/grdis/article/view/896

4. Tripathi M., Jain D., Sharma K., Anuradha, Daulatram. Web Development Framework // International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology. 2024. P. 97–100. DOI: https://doi.org/10.48175/ijarsct-22615 URL: https://ijarsct.co.in/Paper22615.pdf

5. Attri V. K., Pathania P., Simran. Challenges of web development // World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences. 2025. Vol. 14, iss. 1. P. 199–201. DOI: https://doi.org/10.30574/wjaets.2025.14.1.0029 URL: https://journalwjaets.com/node/286

6. Shah H. Advancing Web Development – Enhancing Component-Based Software Engineering and Design Systems Through HTML5 Customized Built-in Elements // International journal of Web & Semantic Technology. 2024. Vol. 15, iss. 1. P. 15–26. DOI: 10.5121/ijwest.2024.15102. URL: https://www.researchgate.net/publication/377564087_Advancing_Web_Development_-_Enhancing_Component-Based_Software_Engineering_and_Design_Systems_through_HTML5_Customized_Built-in_Elements

7. Gu Y. Practical Approaches to Developing High-performance Web Applications Based on React // Frontiers in Science and Engineering. 2025. Vol. 5, iss. 2. P. 99–105. DOI: https://doi.org/10.54691/5ccss512 URL: https://fse-journal.org/index.php/ojs/article/view/22

8. Visconti E., Tsigkanos C., Nenzi L. Automated Monitoring of Web User Interfaces // ACM Transactions on the Web. 2025. Vol. 19, iss. 2. P. 1–27. DOI: https://doi.org/10.1145/3708512 URL: https://dl.acm.org/doi/10.1145/3708512

9. Monteiro M., Branco B. C., Silvestre S., Avelino G., Valente M. T. NoCodeGPT: A No-Code Interface for Building Web Apps With Language Models // Software: Practice and Experience. 2025. DOI: https://doi.org/10.1002/spe.3432 URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/spe.3432

10. Rao N. S. WebAssembly: Revolutionizing Web User Interface Development through Performance and Cross-Language Integration // International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology. 2024. Vol. 10, iss. 6. P. 1973–1981. DOI: https://doi.org/10.32628/cseit241061235 URL: https://ijsrcseit.com/index.php/home/article/view/CSEIT241061235

References

1. Kozub H. O., Kozub Yu. H. (2022). Deklaratyvnyi pidkhid pry stvorenni multyplatformnykh dodatkiv [Declarative approach in creating multiplatform applications]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, no. 5 (275), pp. 10–15. DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-275-5-10-15. [in Ukrainian].

2. Gorai S. K. (2025). Web Development Barriers and Challenges. *International journal of scientific research in engineering and management*, no. 09(01), pp. 1–9. DOI: https://doi.org/10.55041/ijsrem40734 Retrieved from https://ijsrem.com/download/web-development-barriers-and-challenges/ [in English].

3. Maulana I. (2025). Web Accessibility: Designing User-Friendly Websites for Individuals with Visual Impairments. *Golden Ratio of Data in Summary*, no. 5(1), pp. 14–19. DOI: https://doi.org/10.52970/grdis.v5i1.896 Retrieved from https://goldenratio.id/index.php/grdis/article/view/896 [in English].

4. Ms. Monika Tripathi, Ms. Dimpal Jain, Ms. Khushboo Sharma, Ms. Anuradha, & Mr. Daulatram. (2024). Web Development Framework. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, pp. 97–100. DOI: https://doi.org/10.48175/ijarsct-22615 Retrieved from https://ijarsct.co.in/Paper22615.pdf [in English].

5. Varinder Kaur Attri, Purva Pathania, & Simran. (2025). Challenges of web development. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, no. 14(1), pp. 199–201. DOI: https://doi.org/10.30574/wjaets.2025.14.1.0029 Retrieved from https://journalwjaets.com/node/286 [in English].

6. Shah, Hardik. (2024). Advancing Web Development – Enhancing Component-Based Software Engineering and Design Systems Through HTML5 Customized Built-in Elements. International journal of Web & Semantic Technology, no. 15. DOI: 10.5121/ijwest.2024.15102. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/377564087_Advancing_Web_Development_-_Enhancing_Component-Based_Software_Engineering_and_Design_Systems_through_HTML5_Customized_Built-in_Elements [in English].

7. Gu Y. (2025). Practical Approaches to DevelopingHigh-performance Web Applications Based on React. *Frontiers in Science and Engineering*, no. 5(2), pp. 99–105. DOI: https://doi.org/10.54691/5ccss512 Retrieved from https://fse-journal.org/index.php/ojs/article/view/22 [in English].

8. Visconti E., Tsigkanos C., & Nenzi L. (2025). Automated Monitoring of Web User Interfaces. *ACM Transactions on the Web*, no. 19(2), pp. 1–27. DOI: https://doi.org/10.1145/3708512 Retrieved from https://dl.acm.org/doi/10.1145/3708512 [in English].

9. Monteiro M., Branco B. C., Silvestre S., Avelino G., & Valente M. T. (2025). NoCodeGPT: A No-Code Interface for Building Web Apps With Language Models. *Software: Practice and Experience*. DOI: https://doi.org/10.1002/spe.3432 Retrieved from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/spe.3432 [in English].

10. Nikhil Sripathi Rao. (2024). WebAssembly: Revolutionizing Web User Interface Development through Performance and Cross-Language Integration. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, no. 10(6), pp. 1973–1981. DOI: https://doi.org/10.32628/cseit241061235 Retrieved from https://ijsrcseit.com/index.php/home/article/view/CSEIT241061235 [in English].

УДК 628.47:681.5:504.06 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.22

В. М. КОМУСІЙ
аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0009-0009-9530-0535

Л. І. ФЕШАНИЧ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0002-5156-2199

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ У ПРОМИСЛОВІЙ ПЕЧІ

Проблема утилізації твердих побутових відходів (ТПВ) є однією з найактуальніших в Україні через значні обсяги їх накопичення на звалищах (понад 10 млн тонн щороку), низький рівень переробки (5–7 %) та екологічні загрози, такі як викиди метану, забруднення ґрунтових вод і втрата земельних ресурсів. У контексті війни та атак на енергетичну інфраструктуру України спалювання ТПВ із виробництвом енергії розглядається як перспективне альтернативне джерело енергії, що дозволяє зменшувати обсяги відходів до 90 % та генерувати тепло чи електрику. Однак процес спалювання потребує точного керування для мінімізації викидів оксидів азоту (NO_x), *вуглекислого газу* (CO) *та інших токсичних сполук, що є викликом через змінний склад ТПВ (вологість 20–40 %, органічний вміст 50–70 %). Метою цього дослідження є вдосконалення процесу спалювання ТПВ шляхом інтеграції систем вторинного повітря та рециркуляції димових газів у складі комп'ютерно-інтегрованої системи керування (КІСК). У статті детально описано конструкцію промислової печі, яка включає колосникову решітку, камеру допалювання, бункер із дозуючими засувками, а також системи вторинного повітря (вентилятор, форсунки, засувки) та рециркуляції димових газів (вентилятор, теплообмінник, фільтр). КІСК забезпечує адаптивне регулювання параметрів горіння (температура 850–1000 °C, вміст кисню 6–8 %) на основі даних датчиків температури, кисню,* CO *та* NO_x. *Літературний аналіз підтверджує, що вторинне повітря знижує концентрацію* CO *на 15 %, а рециркуляція димових газів зменшує викиди* NO_x *на 10–15 % і економить 8–10 % витрат на очищення газів. Перспективи дослідження включають експериментальну перевірку ефективності запропонованого підходу, впровадження автоматизації через Інтернет речей (IoT) та інтеграцію з технологіями вловлювання* CO_2 *для підвищення екологічної безпеки та енергоефективності.*

Ключові слова: *тверді побутові відходи, спалювання, комп'ютерно-інтегрована система керування, вторинне повітря, рециркуляція димових газів, енергоефективність, викиди* NO_x, *датчики.*

V. M. KOMUSII
Postgraduate Student at the Department of Automation
and Computer-Integrated Technologies
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0009-0009-9530-0535

L. I. FESHANYCH
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation
and Computer-Integrated Technologies
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0002-5156-2199

COMPUTER-INTEGRATED SYSTEM FOR CONTROLLING THE COMBUSTION PROCESS OF SOLID HOUSEHOLD WASTE IN AN INDUSTRIAL FURNACE

The issue of municipal solid waste (MSW) disposal remains critical in Ukraine, where over 10 million tons of waste are generated annually, with only 5–7 % recycled, leading to significant landfill accumulation. This poses environmental threats, including methane emissions, groundwater contamination, and land resource depletion. Amid the ongoing war and attacks on Ukraine's energy infrastructure, MSW incineration with energy recovery emerges as a vital alternative energy source, capable of reducing waste volume by up to 90 % while generating heat or electricity. However, the incineration process requires precise control to minimize emissions of nitrogen oxides (NO_x), *carbon monoxide* (CO), *and other toxic compounds, particularly due to the variable composition of MSW (moisture content 20–40 %, organic content*

50–70 %). This study aims to enhance MSW incineration by integrating secondary air and flue gas recirculation systems within a computer-integrated control system (CICS). The paper provides a detailed description of the industrial furnace design, which includes a grate, an afterburning chamber, a waste bunker with dosing gates, and systems for secondary air (fan, nozzles, valves) and flue gas recirculation (fan, heat exchanger, filter). The CICS enables adaptive regulation of combustion parameters (temperature 850–1000 °C, oxygen content 6–8 %) based on real-time data from temperature, oxygen, CO, *and* NO_x *sensors. Literature analysis confirms that secondary air reduces* CO *concentrations by 15 %, while flue gas recirculation decreases* NO_x *emissions by 10–15 % and saves 8–10 % of gas cleaning costs. Future research directions include experimental validation of the proposed approach, implementation of IoT-based automation, and integration with* CO_2 *capture technologies to enhance environmental safety and energy efficiency.*

Key words: *municipal solid waste, incineration, computer-integrated control system, secondary air, flue gas recirculation, energy efficiency, NOx emissions, sensors.*

Постановка проблеми

Проблема утилізації твердих побутових відходів (ТПВ) є однією з найгостріших у сучасному світі, особливо в Україні, де щороку утворюється понад 10 мільйонів тонн відходів, із яких лише 5–7 % переробляється, а решта накопичується на звалищах [1]. Такі звалища створюють екологічні загрози, зокрема через викиди метану, забруднення ґрунтових вод і втрату земельних ресурсів. В Україні сміттєспалювальна галузь перебуває на початковому етапі розвитку: одним із діючих об'єктів є завод «Енергія» у Києві, який переробляє близько 25 % ТПВ міста і наразі проходить модернізацію для підвищення ефективності та відповідності сучасним екологічним стандартам. Крім того, в Україні функціонують інші установки, зокрема дві мобільні сміттєспалювальні печі в Харкові та одна стаціонарна в Харківській області [2]. Відповідно до Національної стратегії поводження з відходами до 2030 року, планується будівництво нових сміттєспалювальних заводів, що дозволить збільшити частку термічної переробки ТПВ до 10 % [3].

Спалювання ТПВ у промислових печах є перспективним рішенням, яке дозволяє зменшувати обсяги відходів до 90 % і виробляти енергію у вигляді тепла чи електрики [4]. Проте цей метод має свої виклики, пов'язані з необхідністю точного контролю параметрів горіння для зниження екологічного впливу. Основними проблемами є:

- Нестабільність горіння через змінний склад ТПВ (вологість 20–40 %, органічний вміст 50–70 %).
- Високі викиди NOx і CO через надлишок або нестачу кисню в зоні горіння.
- Недостатня ефективність традиційних систем керування, які не адаптуються до змін умов.
- Високі витрати на очищення димових газів через неефективне допалювання летких речовин.

Тема зниження викидів NO_x є особливо актуальною в Україні, оскільки ці сполуки негативно впливають на якість повітря та здоров'я населення, а також потребують відповідності національних стандартів до європейських екологічних норм [5]. Для вирішення цих проблем необхідні сучасні технології, зокрема інтеграція систем вторинного повітря та рециркуляції димових газів у складі комп'ютерно-інтегрованих систем керування (КІСК), які дозволяють адаптивно регулювати параметри процесу в реальному часі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження у сфері спалювання ТПВ активно проводяться з акцентом на зниження екологічного впливу та підвищення енергоефективності. Європейське бюро з інтегрованого запобігання та контролю забруднень (EIPPCB) у своєму звіті зазначає, що найкращі доступні технології (BAT) для спалювання відходів передбачають підтримання температури горіння на рівні 850–1000 °C для мінімізації утворення діоксинів і NO_x [6]. Зокрема, діоксини утворюються при температурах нижче 850 °C, а надлишок кисню може спричинити зростання викидів NO_x [7].

Традиційні системи спалювання часто стикаються з проблемою змінного складу ТПВ, що призводить до нестабільного горіння та підвищених викидів. Наприклад, Chen et al. (2019) показали, що неконтрольоване горіння може збільшувати викиди NO_x на 20–30 % через надлишок кисню в зоні горіння [8]. Для вирішення цієї проблеми застосовуються системи вторинного повітря, які створюють турбулентність і забезпечують допалювання летких речовин. Згідно з дослідженням Li et al. (2020), вторинне повітря може знижувати концентрацію CO на 15 % за рахунок кращого змішування [9].

Системи рециркуляції димових газів також відіграють важливу роль у зниженні викидів. Yang et al. (2018) зазначають, що рециркуляція дозволяє зменшувати концентрацію NOx на 10–15 % шляхом зниження температури горіння та зменшення потоку газів через димохід [10]. Zhang et al. (2021) додають, що рециркуляція може знижувати витрати на очищення газів на 8–10 % за рахунок повторного використання тепла [11].

Інтеграція таких систем із комп'ютерно-інтегрованими системами керування є відносно новим напрямом. Дослідження Дубового та інших авторів підкреслюють, що КІСК дозволяють адаптивно регулювати параметри процесу в реальному часі, підвищуючи стабільність і ефективність [12]. Wang et al. (2022) показали, що використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування складу ТПВ може покращувати точність регулювання на 12 % [13]. Проте бракує комплексних досліджень, які б поєднували системи вторинного повітря, рециркуляцію димових газів і КІСК у єдиному підході, що й стало основою цього дослідження.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є удосконалення процесу спалювання твердих побутових відходів у промисловій печі шляхом інтеграції систем вторинного повітря та рециркуляції димових газів у складі комп'ютерно-інтегрованої системи керування (КІСК). Завдання дослідження:

- Проаналізувати сучасні підходи до спалювання ТПВ та їхні екологічні й енергетичні характеристики.
- Розробити алгоритм керування потоками повітря та димових газів із використанням КІСК.
- Детально описати конструкцію систем вторинного повітря та рециркуляції, їхню взаємодію та роль у процесі.
- Визначити якісні показники (температура, викиди, ККД) для контролю за допомогою датчиків.
- Оцінити потенціал запропонованого підходу на основі літературних даних і визначити перспективи експериментальної перевірки.

Викладення основного матеріалу дослідження

Промислова піч для спалювання ТПВ складається з кількох ключових елементів, які забезпечують ефективну утилізацію відходів і виробництво енергії. Основою печі є колосникова решітка, виготовлена з жаростійкої сталі, здатної витримувати високі температури. Ця решітка слугує для розміщення відходів і забезпечення їхнього рівномірного згоряння. Над решіткою розташована камера допалювання, призначена для повного згоряння летких речовин, що виділяються під час горіння, щоб зменшити утворення токсичних сполук. Бункер для ТПВ оснащений дозуючим пристроєм із шиберними засувками, які дозволяють точно регулювати подачу відходів, забезпечуючи стабільність процесу.

Процес спалювання розпочинається з подачі ТПВ із бункера на колосникову решітку. Завдяки шиберним засувкам відходи завантажуються рівномірно, що запобігає перевантаженню печі та утворенню недогарків. У зоні горіння відходи згорають при температурах 850–1000 °C. Первинне повітря подається знизу через решітку, забезпечуючи інтенсивне згоряння органічних компонентів. Первинний вентилятор підтримує необхідний потік повітря для горіння. Тепло, що виділяється, передається на теплообмінні поверхні, де вода нагрівається, утворюючи пару для приводу турбіни, що генерує енергію [6].

Для забезпечення повного згоряння та зниження викидів у печі передбачено кілька етапів: згоряння (CSP), допалювання летких речовин у камері допалювання, очищення димових газів (FGT) і допоміжні процеси (BOP). Кожен із цих етапів потребує точного регулювання параметрів, таких як температура, вміст кисню та потоки повітря, що досягається за допомогою КІСК [12].

Система вторинного повітря є ключовим елементом для забезпечення повного допалювання летких речовин і зниження викидів токсичних сполук. Вона включає вентилятор потужністю 10 кВт із продуктивністю 3000 м³/год, повітроводи діаметром 200 мм, чотири розподільні засувки та інжекційні форсунки. Засувки мають діаметр 150 мм і регулюються електроприводом із точністю 5 %. Форсунки виготовлені з нержавіючої сталі, мають діаметр 20 мм і розташовані на сторонах бункера та котла в камері допалювання (по 4 форсунки з кожного боку).

Вторинне повітря береться з котельні, де температура становить 30–40 °C, і змішується з парами з екстракторів золи (температура 60 °C) та рециркульованими димовими газами (температура 150 °C після охолодження). Змішане повітря подається через форсунки з потоком 1–1.5 м³/кг відходів, створюючи турбулентність у печі, що покращує змішування димових газів із киснем. Спеціальна геометрія форсунок із кутом нахилу 45° генерує вихровий потік, що сприяє повному допалюванню летких речовин і зменшує утворення діоксинів і фуранів [9].

Система рециркуляції димових газів доповнює процес, повертаючи частину димових газів назад у піч для повторного використання. Вона складається з вентилятора потужністю 12 кВт із продуктивністю 4000 м³/год, повітроводів діаметром 250 мм і вимірювальних інструментів. Димові гази охолоджуються до 150 °C у теплообміннику та очищаються від пилу в циклонному фільтрі перед поверненням у піч.

У разі відмови вентилятора з індукованою тягою (потужність 20 кВт, продуктивність 6000 м³/год) вентилятор рециркуляції автоматично зупиняється завдяки сигналу від датчика тиску, інтегрованого в КІСК. Це забезпечує безпеку процесу та запобігає аварійним ситуаціям [12]. Рециркульовані гази стають частиною змішаного повітря, що подається через систему вторинного повітря, створюючи замкнутий цикл, який оптимізує горіння та знижує екологічний вплив.

На схемі зображено основні компоненти системи: бункер із шиберними засувками, колосникову решітку, зону горіння, камеру допалювання, систему вторинного повітря (вентилятор, засувки, форсунки), систему рециркуляції димових газів (вентилятор, повітроводи), теплообмінник. Датчики температури позначені в зоні горіння та камері допалювання, датчики O_2 і NO_x – у потоці димових газів, витратоміри – на вході первинного та вторинного повітря.

Алгоритм керування, інтегрований у КІСК, розроблений для адаптивного регулювання процесу спалювання ТПВ і базується на даних сенсорів. Алгоритм складається з двох основних етапів:

- Збір даних: Дані з датчиків температури, O_2, CO, NOx, тиску та витратомірів надходять у КІСК у реальному часі. Це дозволяє системі постійно відстежувати стан процесу та реагувати на зміни умов, таких як зміна складу ТПВ.

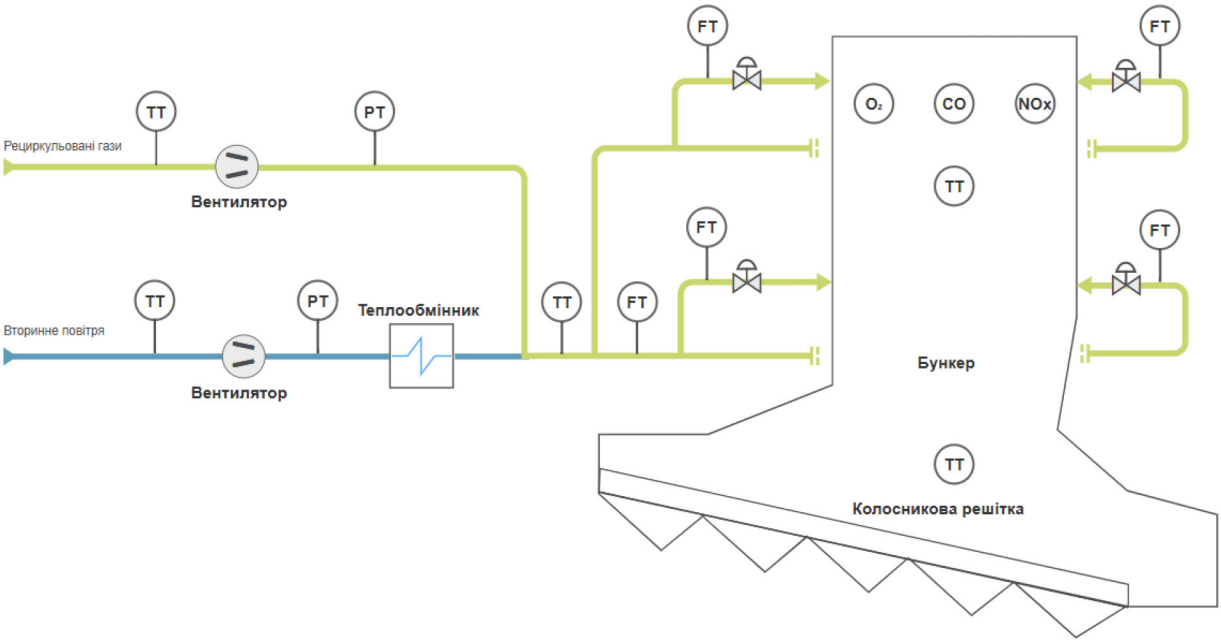


Рис. 1. Схема системи спалювання ТПВ

• Адаптивне регулювання: На основі аналізу даних алгоритм розраховує заданий потік змішаного повітря та коригує положення засувок (з точністю 5 %) для підтримання оптимальних умов горіння (температура 850–1000 °C, вміст O_2 6–8 %) [12]. Наприклад, якщо датчики O_2 показують надлишок кисню (понад 8 %), система зменшує подачу вторинного повітря, щоб уникнути зростання викидів NO_x.

Алгоритм також враховує безпекові аспекти: у разі відмови вентилятора з індукованою тягою КІСК автоматично зупиняє вентилятор рециркуляції, що запобігає аварійним ситуаціям. Такий підхід дозволяє системі адаптуватися до змінного складу ТПВ і підтримувати стабільність процесу, що є важливим для зниження викидів і підвищення енергоефективності.

Потенціал запропонованого підходу

На основі літературних даних запропонований підхід має значний потенціал для покращення процесу спалювання ТПВ. Згідно з дослідженням Li et al. (2020), використання вторинного повітря з вихровим потоком може знижувати концентрацію CO на 15 % за рахунок повного допалювання летких речовин [9]. Yang et al. (2018) зазначають, що рециркуляція димових газів здатна зменшувати викиди NOx на 10–15 % шляхом зниження температури горіння та зменшення потоку газів через димохід [10]. Zhang et al. (2021) додають, що рециркуляція може економити 8–10 % витрат на очищення димових газів за рахунок повторного використання тепла [11].

Інтеграція систем вторинного повітря та рециркуляції в КІСК дозволяє досягати синергетичного ефекту:

• Турбулентність, створена вихровим потоком, покращує змішування димових газів із киснем, що сприяє повному згорянню.

• Рециркуляція димових газів знижує викиди NO_x і оптимізує використання тепла.

• Адаптивне регулювання за допомогою КІСК забезпечує стабільність процесу незалежно від змін складу ТПВ.

Висновки

У цьому дослідженні було розглянуто можливості вдосконалення процесу спалювання твердих побутових відходів (ТПВ) у промисловій печі шляхом інтеграції сучасних технологій, таких як системи вторинного повітря та рециркуляції димових газів, у складі комп'ютерно-інтегрованої системи керування (КІСК). Проведений аналіз літератури показав, що ці системи дозволяють значно знизити викиди шкідливих речовин, зокрема NO_x і CO, а також підвищити енергоефективність процесу. Запропонований підхід базується на адаптивному регулюванні параметрів горіння в реальному часі, що є особливо важливим у контексті змінного складу ТПВ, який часто створює виклики для традиційних систем спалювання.

Описана конструкція печі, системи вторинного повітря та рециркуляції димових газів, а також алгоритм керування в КІСК демонструють потенціал для створення синергетичного ефекту. Вихровий потік, створюваний вторинним повітрям, сприяє повному допалюванню летких речовин, тоді як рециркуляція газів допомагає зменшити температуру горіння і, відповідно, викиди NO_x. Використання датчиків для моніторингу температури, вмісту кисню, CO та NO_x забезпечує точний контроль процесу, що є критично важливим для дотримання екологічних стандартів, особливо в умовах України, де екологічні норми стають дедалі суворішими в рамках гармонізації з європейськими вимогами

Список використаної літератури

1. ECOBUSINESS. (2017). Спалювання відходів: вигоди і обмеження [Waste incineration: Benefits and limitations]. Retrieved from https://ecolog-ua.com/articles/spalyuvannya-vidhodiv-vygody-i-obmezhennya

2. DLF Attorneys-at-Law. (n.d.). Ukrainian national waste management strategy. Retrieved from https://dlf.ua/en/ukrainian-national-waste-management-strategy/

3. Lexology. (n.d.). Waste-to-energy: How Ukraine can generate heat and electricity from municipal waste. Retrieved from https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=2b7e7d8d-1e5c-4f5f-9b5f-7e9f2c8e8c2e

4. Department for Environment, Food & Rural Affairs (DEFRA). (2013). Incineration of municipal solid waste. UK Government.

5. Верховна Рада України. (n.d.). Закон України «Про охорону атмосферного повітря» [Law of Ukraine "On Air Protection"]. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12

6. European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB). (2006). Best available techniques (BAT) reference document for waste incineration. Retrieved from https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-03/superseded_wi_bref_0806_0.pdf

7. Niessen, W. R. (2010). Combustion and incineration processes: Applications in environmental engineering. CRC Press.

8. Chen, D., Yin, L., & Wang, H. (2019). Challenges in municipal solid waste incineration: A review. Waste Management, 92, 45–56. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.032

9. Li, J., Zhang, X., & Chen, L. (2020). Optimization of secondary air distribution in municipal solid waste incineration for emission reduction. Energy Reports, 6, 451–460. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.015

10. Yang, Y., Wang, Y., & Zhang, J. (2018). Effects of flue gas recirculation on NOx emissions in waste incineration systems. Journal of Cleaner Production, 185, 123–130. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.045

11. Zhang, Q., Li, Y., & Xu, J. (2021). Energy recovery and emission reduction through flue gas recirculation in waste incineration. Renewable Energy, 168, 789–799. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.085

12. Дубовой, В. М. (Ред.). (2018). Промислові комп'ютерно-інтегровані системи: принципи проектування та експлуатації [Industrial computer-integrated systems: Design and operation principles]. Київ : НТУУ «КПІ».

13. Wang, H., Liu, X., & Zhang, S. (2022). Machine learning applications in waste incineration: A review. Environmental Science and Pollution Research, 29(15), 21034–21045. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17856-3

References

1. ECOBUSINESS. (2017). Waste incineration: Benefits and limitations. Retrieved from https://ecolog-ua.com/articles/spalyuvannya-vidhodiv-vygody-i-obmezhennya

2. DLF Attorneys-at-Law. (n.d.). Ukrainian national waste management strategy. Retrieved from https://dlf.ua/en/ukrainian-national-waste-management-strategy/

3. Lexology. (n.d.). Waste-to-energy: How Ukraine can generate heat and electricity from municipal waste. Retrieved from https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=2b7e7d8d-1e5c-4f5f-9b5f-7e9f2c8e8c2e

4. Department for Environment, Food & Rural Affairs (DEFRA). (2013). Incineration of municipal solid waste. UK Government.

5. Verkhovna Rada of Ukraine. (n.d.). Law of Ukraine "On Air Protection". Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12

6. European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB). (2006). Best available techniques (BAT) reference document for waste incineration. Retrieved from https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-03/superseded_wi_bref_0806_0.pdf

7. Niessen, W. R. (2010). Combustion and incineration processes: Applications in environmental engineering. CRC Press.

8. Chen, D., Yin, L., & Wang, H. (2019). Challenges in municipal solid waste incineration: A review. Waste Management, 92, 45–56. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.032

9. Li, J., Zhang, X., & Chen, L. (2020). Optimization of secondary air distribution in municipal solid waste incineration for emission reduction. Energy Reports, 6, 451–460. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.015

10. Yang, Y., Wang, Y., & Zhang, J. (2018). Effects of flue gas recirculation on NOx emissions in waste incineration systems. Journal of Cleaner Production, 185, 123–130. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.045

11. Zhang, Q., Li, Y., & Xu, J. (2021). Energy recovery and emission reduction through flue gas recirculation in waste incineration. Renewable Energy, 168, 789–799. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.085

12. Dubovoy, V. M. (Ed.). (2018). Industrial computer-integrated systems: Design and operation principles. Kyiv : NTUU "KPI".

13. Wang, H., Liu, X., & Zhang, S. (2022). Machine learning applications in waste incineration: A review. Environmental Science and Pollution Research, 29(15), 21034–21045. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17856-3

УДК 004.43:81322 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.23

М. І. КОНИК
аспірант кафедри інформаційних систем та мереж
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0009-0001-1692-4262

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ТА МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТОНАЛЬНОСТІ ТЕКСТУ В КОНТЕКСТІ ОПРАЦЮВАННЯ ВІДГУКІВ МЕШКАНЦІВ МІСТА

У статті представлено ґрунтовний порівняльний аналіз сучасних підходів і методів, що застосовуються для визначення емоційного тону тексту, з особливим акцентом на україномовний контент. Актуальність дослідження зумовлена зростаючою потребою в ефективних інструментах для обробки зворотного зв'язку від громадян, зібраного через цифрові платформи, мобільні застосунки та соціальні мережі, які є цінними джерелами інформації для вдосконалення міського управління та якості надання послуг. Метою дослідження є подолання методологічного та лінгвістичного розриву в аналізі тональності українською мовою, яка, на відміну від англійської, досі залишається недостатньо забезпеченою лексичними базами, корпусами та попередньо навченими моделями.

У статті систематизовано методи аналізу тональності в межах чотирьох основних парадигм: лексиконно-орієнтованого, підходу на основі правил, підходу машинного навчання та гібридного. Для кожного підходу розглянуто його теоретичне підґрунтя, характерні алгоритми, лінгвістичні інструменти та приклади практичного застосування. Лексиконно-орієнтовані методи, зокрема ті, що використовують словник NRC EmoLex та корпусні інструменти на кшталт Sketch Engine, відзначаються простотою використання та адаптивністю до середовищ із обмеженими ресурсами. Підходи на основі правил, такі як VADER і LIWC, виокремлюються здатністю враховувати синтаксичну структуру, підсилювачі та заперечення, забезпечуючи кращу інтерпретованість, хоча й обмежену мовну універсальність.

У розділі, присвяченому машинному навчанню, розглянуто як традиційні алгоритми класифікації – зокрема моделі на основі граничних гіперплощин, ймовірнісного підходу та деревоподібних структур, – так і сучасні архітектури глибокого навчання, включно з багатошаровими нейронними мережами. Також проаналізовано підхід максимальної ентропії як приклад статистичного моделювання з мінімальними припущеннями щодо вхідних ознак.

Особливу увагу приділено сучасним глибоким нейронним мережам – згортковим нейронним мережам (CNN), рекурентним мережам LSTM та трансформерним архітектурам, таким як BERT, RoBERTa і GPT. Представлені емпіричні результати з останніх досліджень підтверджують високу ефективність трансформерних моделей у багатомовних умовах, зокрема при аналізі тональності українських текстів, де моделі XLM-RoBERTa та Ukr-RoBERTa досягли точності понад 91 %.

У завершальній частині статті розглянуто гібридні моделі, що поєднують переваги різних підходів з метою підвищення стійкості, точності та адаптивності до доменної специфіки. Ось перефразований варіант:

Запропонована класифікаційна структура, розроблена на основі результатів дослідження, забезпечує цілісне уявлення про існуючі методи та становить методологічне підґрунтя для розробки інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень в управлінні містом із залученням громадськості.

У висновках окреслено перспективи подальших досліджень, серед яких – локалізація моделей глибокого навчання для української мови, інтеграція аналізу тональності з виділенням тем і іменованих сутностей, а також застосування методів напівконтрольованого та активного навчання для покращення результатів у разі обмеженості анотованих даних. Загалом, запропонована таксономія не лише відображає поточний стан технологій аналізу тональності, а й задає вектори їх подальшого розвитку в умовах багатомовності та соціально орієнтованих застосувань.

Ключові слова: *аналіз тональності, лексикон, підхід на основі правил, гібридні методи, трансформерні моделі, природна мова.*

M. I. KONYK
Postgraduate Student at the Department of Information Systems and Networks
National University "Lviv Polytechnic"
ORCID: 0009-0001-1692-4262

COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES AND METHODS FOR SENTIMENT ANALYSIS OF TEXT IN THE CONTEXT OF PROCESSING CITY RESIDENTS' FEEDBACK

The article presents a comprehensive comparative analysis of contemporary approaches and methods used to determine the emotional tone of text, with a particular emphasis on Ukrainian-language content. The relevance of this study stems from the growing need for effective tools to process citizen feedback collected via digital platforms, mobile applications,

and social media – all of which serve as valuable sources of information for improving urban governance and service delivery. The research aims to address both methodological and linguistic gaps in sentiment analysis for the Ukrainian language, which, unlike English, remains under-resourced in terms of lexicons, corpora, and pretrained models.

The study systematizes sentiment analysis methods into four main paradigms: those relying on predefined lexicons, those governed by linguistic rules, data-driven learning techniques, and integrated models that combine multiple strategies.For each paradigm, the theoretical foundations, typical algorithms, linguistic tools, and practical application examples are discussed. Lexicon-based methods, such as those utilizing the NRC EmoLex dictionary and corpus tools like Sketch Engine, are noted for their simplicity and adaptability to low-resource environments. Rule-based systems, including VADER and LIWC, stand out for their ability to account for syntactic structure, intensifiers, and negations, offering better interpretability, albeit with limited language generalizability.

The section on machine learning explores both traditional classification algorithms – including models based on decision boundaries, probabilistic inference, and tree-like structures – and modern deep learning architectures, such as multilayer neural networks. The maximum entropy approach is also examined as a representative of statistical modeling that requires minimal assumptions about input features.

Particular attention is given to recent advancements in deep neural networks, namely convolutional neural networks (CNN), recurrent LSTM networks, and transformer-based architectures such as BERT, RoBERTa, and GPT. Empirical results from recent studies confirm the high effectiveness of transformer models in multilingual contexts, especially in sentiment analysis of Ukrainian texts, where models like XLM-RoBERTa and Ukr-RoBERTa have achieved accuracy levels exceeding 91 %.

The final part of the article discusses hybrid models that combine the strengths of different paradigms to enhance robustness, accuracy, and adaptability to domain-specific data. The proposed classification framework, developed on the basis of the conducted research, provides a coherent overview of existing methods and serves as a methodological foundation for the development of intelligent decision-support systems in urban governance with active citizen participation.

The conclusions outline directions for further research, including the localization of deep learning models for Ukrainian, integration of sentiment analysis with topic modeling and named entity recognition, and the application of semi-supervised and active learning techniques to improve outcomes in scenarios with limited annotated data. Overall, the proposed taxonomy not only reflects the current state of sentiment analysis technologies but also outlines future development trajectories in multilingual and socially oriented applications.

Key words: *sentiment analysis, lexicon, rule-based approach, hybrid methods, transformer models, natural language.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах швидкої урбанізації та зростання чисельності міського населення ефективне управління міською інфраструктурою стає важливим завданням для органів місцевого самоврядування. Відгуки громадян, зібрані через різноманітні цифрові платформи, соціальні мережі, мобільні застосунки та інші канали комунікації, є цінним джерелом інформації про якість міських послуг, стан інфраструктури, екологічні проблеми та інші аспекти життєдіяльності міст. Аналіз відгуків мешканців дозволяє не лише виявляти існуючі проблеми, але й прогнозувати тенденції громадської думки, що сприяє підвищенню якості прийняття рішень у міському управлінні. Застосування методу сентимент-аналізу щодо обробки текстових даних допомагає оцінити ставлення мешканців до різних аспектів міського середовища.

Актуальність дослідження методів визначення емоційного забарвлення тексту зумовлена необхідністю оперативного виявлення проблемних аспектів у зворотному зв'язку від громадськості, формування аналітичних звітів для органів державної та муніципальної влади, а також підвищення якості прийняття управлінських рішень [1]. Емоційний аналіз тексту (sentiment analysis) є складною задачею природної мовної обробки, яка потребує врахування як семантичних, так і синтаксичних особливостей мови, контексту висловлювання, полісемії та іронії.

На відміну від англійської мови, для якої розроблено велику кількість ресурсів, лексиконів, корпусів та моделей машинного навчання для аналізу емоцій, українськомовні тексти досі є недостатньо забезпеченими відповідними інструментами та лінгвістичними ресурсами. Це створює додаткові труднощі при розробці автоматизованих систем аналізу емоційного тону україномовного контенту та підвищує вимоги до вибору методологічного підходу до вирішення цього завдання.

Зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Розв'язання задачі визначення емоційного забарвлення україномовного тексту має важливе значення як з наукової, так і з практичної точки зору. З наукового боку це пов'язано з розширенням лінгвістичних та інтелектуальних технологій для обробки природної мови, розробкою моделей аналізу тональності, адаптованих до морфологічних та синтаксичних особливостей української мови, а також з удосконаленням методів машинного та глибинного навчання для мультимовного середовища.

З прикладної точки зору, результати таких досліджень є критично важливими для створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, зокрема у сфері муніципального управління, де аналіз звернень громадян дозволяє здійснювати моніторинг громадських настроїв, виявляти негативні сигнали та формувати обґрунтовані

управлінські дії на основі емоційного тону зворотного зв'язку. Застосування таких підходів сприяє розвитку партисипативних механізмів управління та підвищує рівень прозорості, відкритості й довіри між владою та громадянами [2]. У цьому контексті постає завдання порівняльного аналізу сучасних підходів і методів визначення емоційного забарвлення текстів, їх класифікації та визначення придатності до обробки україномовного матеріалу.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є систематизація сучасних підходів і методів визначення тональності текстових даних, а також розроблення узагальненої класифікаційної моделі, яка враховує специфіку завдань аналізу емоційного тону у контексті інтелектуальної платформи для підтримки прийняття рішень управління містом із залученням громадськості. Особливу увагу зосереджено на можливостях застосування відповідних методів до україномовного тексту, що надходить від мешканців у вигляді звернень, пропозицій та відгуків.

Викладення основного матеріалу дослідження

У сучасній практиці аналізу тональності сформувалося кілька концептуальних підходів: лексиконно-орієнтований, rule-based, машинного навчання та гібридний. У цій роботі здійснено їх порівняльний аналіз із прикладами реалізації, оцінкою ефективності та перспективністю застосування в україномовному інформаційному просторі.

1. Підхід на основі лексикону (Lexicon-Based)

Лексиконно-орієнтовані методи базуються на словниках, які пов'язують слова з полярністю або емоціями. У межах лексиконного методу виділяють два підходи. Перший – це dictionary-based підхід, який формує лексикони від базових «seed words» та використовує онлайн-словники для їх розширення. Прикладом є NRC EmoLex, який пов'язує понад 14 тис. слів з восьмома емоціями та має українську версію. У роботі [3] EmoLex було використано для аналізу економічних текстів до/під час COVID-19. Для частотного аналізу застосовано Sketch Engine, а загальну тональність – Lingmotif 2. Дослідження виявило зміни емоційного фону публікацій у кризовий період. Другий – Corpus-based підхід, що аналізує контекст вживання слів у корпусах. У дослідженні [4] поєднання цього підходу з SVM дало високу точність аналізу, а також підтвердило залежність якості від повноти лексикону.

2. Підхід на основі правил (Rule-Based)

Підхід на основі правил поєднує лексикон з набором лінгвістичних правил, що дозволяють враховувати граматику, заперечення, підсилювачі та контекстуальні зміни полярності. На відміну від лексиконного підходу, де кожне слово має фіксовану емоційну оцінку, Rule-Based система може адаптувати цю оцінку залежно від мовної структури речення.

Одним із найпоширеніших інструментів є VADER, який враховує інтенсивність емоцій через пунктуацію, капіталізацію та модифікатори. У дослідженні [5] за допомогою VADER проаналізовано понад мільйон твітів про COVID-19 у Нігерії. Результати показали: позитивна тональність – 39,8 %, нейтральна – 31,3 %, негативна – 28,9 %, що перевищило точність TextBlob у виявленні полярності.

Інший приклад – LIWC (Linguistic Inquiry and Word Count), який класифікує слова за психологічними категоріями. У роботі [6] LIWC порівнювали з SVM при класифікації індонезійських твітів на теми етнічності й релігії. LIWC був ефективнішим для позитивної тональності (F1 = 0.69), тоді як SVM краще визначав негативну (F1 = 0.72). Додавання нових термінів до словника покращило середнє значення F1 до 0.64.

Хоча rule-based методи поступаються за гнучкістю глибокому навчанню, вони цінні завдяки прозорості логіки, інтерпретованості та відносній простоті адаптації. Вони також можуть бути інтегровані як компоненти гібридних систем, підвищуючи точність в умовах обмежених ресурсів або у специфічних доменах.

3. Підхід машинного навчання

Машинне навчання (ML) є одним з провідних підходів до аналізу тональності тексту, адже дає змогу виявляти приховані закономірності у великих обсягах текстових даних без необхідності ручного формалізування лінгвістичних правил. Залежно від типу навчання, ці підходи поділяються на контрольоване навчання, неконтрольоване навчання та напівконтрольоване навчання [7].

Контрольоване навчання є найбільш розповсюдженим підходом у задачах аналізу тональності тексту, що базується на використанні розмічених корпусів, де кожному фрагменту тексту присвоєна мітка емоційної полярності. Метою є побудова моделі класифікації, яка здатна узагальнювати залежності між текстовими ознаками та відповідною тональністю.

Серед лінійних моделей ефективність демонструє метод опорних векторів (SVM), що добре працює з малими наборами даних. У дослідженні [8] SVM перевершив Random Forest за точністю (80,39 % проти 78,56 %), підтвердивши свою ефективність у задачах бінарної класифікації з чітким розмежуванням класів.

Логістична регресія, незважаючи на простоту, також показує конкурентні результати. Зокрема, у роботі [9] вона досягла точності 84,92 % при класифікації англомовних твітів, продемонструвавши її доцільність для багатомовних даних.

Штучні нейронні мережі (ANN) використовуються для моделювання складних нелінійних залежностей. У роботі [10] покращена модель з механізмом уваги перевершила базові ANN та SVM, забезпечивши зростання точності та F1-міри на корпусах із соціальних мереж.

Імовірнісні методи, як-от наївний байєс (NB), завдяки простоті реалізації та високій швидкості, залишаються популярними у прикладних задачах. Наприклад, у [11] застосували NB для класифікації скарг громадян в Індонезії, досягнувши 92 % точності, що демонструє його ефективність для адміністративних цілей.

Метод максимальної ентропії (MaxEnt) дозволяє працювати з неоднорідними ознаками без припущення про їхню незалежність. У дослідженні [12], присвяченому аналізу відгуків про застосунок Shopee, модель MaxEnt досягла точності 97,32 %, продемонструвавши свою високу ефективність для класифікації користувацьких оцінок.

Серед сучасних глибоких моделей CNN та LSTM показують високу продуктивність: відповідно 90,2 % на Yelp [13] та 86,85 % на IMDB [14]. LSTM ефективно працює з довгими послідовностями, а CNN – з локальними патернами у тексті.

Значний прорив забезпечили трансформерні моделі. У роботі [15] BERT досяг точності до 89 % на Twitter, F1-міра для позитивного класу склала 0.88. У контексті української мови, робота [16] порівняла кілька трансформерних архітектур, серед яких XLM-RoBERTa досягла 91,32 %, а Ukr-RoBERTa – 91,18 % із меншою потребою в ресурсах.

Окремо варто відзначити GPT. У дослідженні [17] модель SentimentGPT досягла точності 94,1 % та дозволила не лише класифікувати, а й генерувати пояснення до прийнятих рішень. Архітектура поєднує prompt-based взаємодію, fine-tuning GPT на розмічених корпусах та інтеграцію ембеддінгів у класичні ML-моделі. Підсумовуючи, методи контрольованого навчання демонструють різний баланс між точністю, інтерпретованістю та ресурсомісткістю. SVM і логістична регресія є ефективними при роботі з невеликими наборами даних, тоді як дерева рішень забезпечують зручність інтерпретації, але менш стабільні. Глибокі нейронні мережі, особливо трансформери, значно підвищують якість класифікації, хоча вимагають значних обчислювальних ресурсів. У практичних застосуваннях вибір методу часто обумовлений потребою в швидкості, доступності ресурсів та вимогах до пояснюваності.

Неконтрольоване навчання використовується для аналізу текстів без наявності міток, що дозволяє виявляти приховані закономірності та структури в даних. Цей підхід є особливо корисним для кластеризації громадських звернень, тематичного моделювання та виявлення трендів у суспільних настроях. До основних методів належать алгоритми кластеризації, такі як K-Means [18] і DBSCAN [19], які групують схожі за змістом документи, тематичне моделювання за допомогою Latent Dirichlet Allocation (LDA) [20]. K-Means підходить для кластерів з чіткою формою, тоді як DBSCAN краще справляється з кластерами довільної форми. LDA є ефективним для тематичного моделювання, хоча ігнорує синтаксис і потребує ретельного налаштування кількості тем. Ці методи доцільні при первинному аналізі великих обсягів неструктурованих текстів, особливо у випадках виявлення нових тем або трендів.

Напівконтрольоване навчання поєднує обидва підходи, використовуючи як мічені, так і не мічені дані. Це дозволяє використовувати великий масив громадських звернень, навіть якщо лише частина з них має вказану тональність. У цьому контексті широко застосовуються методи самонавчання (self-training) та ко-тренування [21], що дозволяють поступово розширювати обсяг мічених прикладів. Зокрема, в гібридних системах поєднуються генеративні та графові підходи (GNN) [22], що дозволяє зберегти баланс між узагальненням і точністю. У мультивидових підходах текст представлено в різних векторних просторах (словникових, синтаксичних, ембедінгових), що дозволяє моделі синтезувати знання з різних джерел та формувати більш стійке рішення. Таблиця 3 відображає підсумковий опис переваг та недоліків методів напівконтрольованого навчання. Отже, Self-training є найпростішим, але схильним до накопичення помилок. Co-training зменшує цей ефект, однак вимагає наявності кількох незалежних представлень даних. Новітні підходи, як-от GNN, демонструють перспективи в обробці складних графових структур, хоча їх результативність істотно визначається тим, наскільки точно змодельовано взаємозв'язки між об'єктами.

4. Гібридний підхід

Гібридний підхід у завданнях аналізу тональності тексту являє собою інтеграцію методів, що належать до різних концептуальних парадигм, зокрема лексиконного, rule-based та машинного навчання. Основна ідея полягає у поєднанні переваг кожного з підходів з метою підвищення точності класифікації, стійкості до шумів, гнучкості у роботі з різними мовами та доменами. Така комбінація дає змогу ефективніше обробляти неоднозначні або контекстно залежні висловлювання, які є складними для аналізу за допомогою окремих підходів. У гібридних системах лексикони можуть використовуватись для початкової фільтрації або вагового моделювання ознак, що подаються до класифікатора машинного навчання. З іншого боку, rule-based механізми можуть слугувати джерелом апріорного знання або бути інтегрованими як евристики при формуванні навчальної вибірки. Така синергія дозволяє компенсувати обмеження окремих підходів і покращити загальну ефективність системи. Так, дослідження [23], представило гібридний ансамблевий підхід для аналізу тональності коротких текстів, інтегруючи глибоке навчання з традиційними методами машинного навчання. Використовуючи комбінацію моделей LSTM, Random Forest та логістичної регресії, дослідники досягли точності 83.24 %, що перевищує результати окремих моделей. Практичним підсумком проведеного аналізу є сформована класифікаційна схема (Рис. 1) яка систематизує основні напрями в межах цієї задачі.

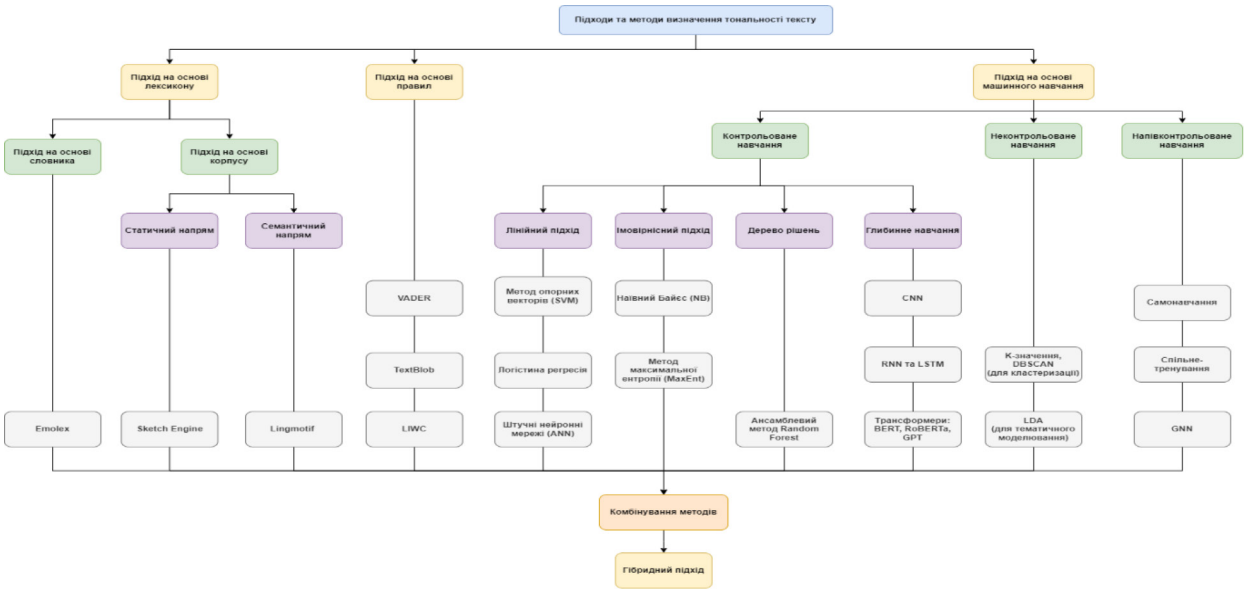


Рис. 1. Класифікаційна схема підходів та методів визначення тональності тексту

Висновки та перспективи

У межах дослідження сформовано класифікаційну схему підходів до визначення тональності тексту, яка узагальнює сучасні методи та враховує специфіку українськомовного контенту. Запропонована структура є складовою інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень на основі аналізу звернень мешканців, що дозволяє виявляти суспільні настрої та критичні проблеми.

Подальші дослідження передбачають локалізацію глибоких моделей (BERT, RoBERTa, GPT), створення гібридних підходів із залученням онтологічних знань, аналіз динаміки емоційного фону, а також інтеграцію тонального аналізу з тематичним, просторовим і суб'єктним. Особливу увагу слід приділити методам активного та напівконтрольованого навчання для ефективної роботи з частково розміченими зверненнями.

Класифікація, запропонована у роботі, окреслює орієнтири подальшого розвитку аналітичних систем у сфері цифрового врядування та громадської участі в управлінні містом.

Список використаної літератури

1. Cambria, E., Schuller, B., Xia, Y., & Havasi, C. (2013). New avenues in opinion mining and sentiment analysis. *IEEE Intelligent Systems*, 28(2), 15–21.

2. Kotsyba, N., Romanyshyn, O., & Shevchuk, O. (2021). Challenges in Sentiment Analysis for the Ukrainian Language. *CEUR Workshop Proceedings*, 2917, 118–126.

3. Vargas-Sierra, C., & Orts, M. (2023). *Sentiment and emotion in financial journalism: a corpus-based, cross-linguistic analysis of the effects of COVID*. Humanities and Social Sciences Communications, 10. https://doi.org/10.1057/s41599-023-01725-8

4. Abdulla, N. A., Ahmed, N. A., Shehab, M. A., & Al-Ayyoub, M. (2013). *Arabic sentiment analysis: lexicon-based and corpus-based*. IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT).

5. Abiola, O., Abayomi-Alli, A., Tale, O.A. et al. (2023). *Sentiment analysis of COVID-19 tweets from selected hashtags in Nigeria using VADER and Text Blob analyser*. Journal of Electrical Systems and Information Technology, 10, 5. https://doi.org/10.1186/s43067-023-00070-9

6. Karyawati, A. E., Utomo, P. A., & Wibawa, I. G. A. (2022). Comparison of SVM and LIWC for Sentiment Analysis of SARA. *IJCCS (Indonesian Journal of Computing and Cybernetics Systems)*, *16*(1), 45–54.

7. Birjali, M., Kasri, M., & Beni-Hssane, A. (2021). A comprehensive survey on sentiment analysis: Approaches, challenges and trends. Knowledge-Based Systems, 226, 107134.

8. Khan, M. J., Abbas, Q., & Hussain, M. (2024). *Comparative study of supervised learning techniques for sentiment classification*. Computers, Materials & Continua, 78(1), 1–16. https://doi.org/10.32604/cmc.2023.043301

9. Aliman, N. M., Mustaffa, M., Jambari, H., & Jusoh, M. S. (2022). *Performance evaluation of supervised learning algorithms for sentiment analysis: A comparative study*. Journal of Engineering and Applied Sciences, 17(5), 143–150.

10. Lu, W., Wang, J., Wang, Y., Zhou, Y., & Qin, H. (2021). *Sentiment analysis of social media texts with deep learning models and attention mechanism*. Information, 12(10), 392. https://doi.org/10.3390/info12100392

11. Wabang, G. S., Ahmad, T., & Wijaya, D. E. (2022). *Application of the Naive Bayes Classifier Algorithm to Classify Community Complaints*. Journal of Physics: Conference Series, 2180(1), 012045. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2180/1/012045

12. Rhohmawati, A., Sari, R. F., & Puspitasari, R. (2019). *Sentiment analysis using maximum entropy for Shopee reviews*. In 2019 4th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE) (pp. 237–242). IEEE.

13. Kim, J., & Jeong, Y. (2019). *Sentiment classification using convolutional neural networks*. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 10(5), 303–308.

14. Tholusuri, H., Gadde, P. R., & Sista, S. R. (2019). *Sentiment analysis using LSTM with IMDB dataset*. In 2019 4th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES) (pp. 1192–1195). IEEE.

15. Roccabruna, S., Nesi, P., & Pantaleo, G. (2022). *A comparison of BERT-based models for sentiment analysis in social media*. Applied Sciences, 12(6), 3016. https://doi.org/10.3390/app12063016

16. Prytula, Y. (2024). *Evaluation of transformer-based models for sentiment analysis of Ukrainian texts*. Proceedings of the International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS), 2024.

17. Kheiri, M., & Karimi, M. (2023). *SentimentGPT: Prompt-based sentiment analysis using generative pre-trained transformers*. Journal of Big Data, 10, Article 42. https://doi.org/10.1186/s40537-023-00708-4

18. Riaz, S., Fatima, M., Kamran, M., & Nisar, M. W. (2019). Opinion mining on large scale data using sentiment analysis and k-means clustering. Cluster Computing, 22, 7149–7164.

19. Andriyani, F., & Puspitarani, Y.. (2022). Performance Comparison of K-Means and DBScan Algorithms for Text Clustering Product Reviews. *Sinkron : Jurnal Dan Penelitian Teknik Informatika*, *6*(3), 944–949. https://doi.org/10.33395/sinkron.v7i3.11569

20. Xue, J., Chen, J., Chen, C., Zheng, C., Li, S., & Zhu, T. (2020). Public discourse and sentiment during the COVID-19 pandemic: Using Latent Dirichlet Allocation for topic modeling on Twitter. PloS one, 15(9), e0239441.

21. Riaz, S., Fatima, M., Kamran, M., & Nisar, M. W. (2019). Opinion mining on large scale data using sentiment analysis and k-means clustering. Cluster Computing, 22, 7149–7164.

22. Andriyani, F., & Puspitarani, Y.. (2022). Performance Comparison of K-Means and DBScan Algorithms for Text Clustering Product Reviews. *Sinkron : Jurnal Dan Penelitian Teknik Informatika*, *6*(3), 944–949. https://doi.org/10.33395/sinkron.v7i3.11569

23. Xue, J., Chen, J., Chen, C., Zheng, C., Li, S., & Zhu, T. (2020). Public discourse and sentiment during the COVID-19 pandemic: Using Latent Dirichlet Allocation for topic modeling on Twitter. PloS one, 15(9), e0239441.

References

1. Cambria, E., Schuller, B., Xia, Y., & Havasi, C. (2013). New avenues in opinion mining and sentiment analysis. *IEEE Intelligent Systems*, 28(2), 15–21.

2. Kotsyba, N., Romanyshyn, O., & Shevchuk, O. (2021). Challenges in Sentiment Analysis for the Ukrainian Language. *CEUR Workshop Proceedings*, 2917, 118–126.

3. Vargas-Sierra, C., & Orts, M. (2023). *Sentiment and emotion in financial journalism: a corpus-based, cross-linguistic analysis of the effects of COVID*. Humanities and Social Sciences Communications, 10. https://doi.org/10.1057/s41599-023-01725-8

4. Abdulla, N. A., Ahmed, N. A., Shehab, M. A., & Al-Ayyoub, M. (2013). *Arabic sentiment analysis: lexicon-based and corpus-based*. IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT).

5. Abiola, O., Abayomi-Alli, A., Tale, O.A. et al. (2023). *Sentiment analysis of COVID-19 tweets from selected hashtags in Nigeria using VADER and Text Blob analyser*. Journal of Electrical Systems and Information Technology, 10, 5. https://doi.org/10.1186/s43067-023-00070-9

6. Karyawati, A. E., Utomo, P. A., & Wibawa, I. G. A. (2022). Comparison of SVM and LIWC for Sentiment Analysis of SARA. *IJCCS (Indonesian Journal of Computing and Cybernetics Systems)*, *16*(1), 45–54.

7. Birjali, M., Kasri, M., & Beni-Hssane, A. (2021). A comprehensive survey on sentiment analysis: Approaches, challenges and trends. Knowledge-Based Systems, 226, 107134.

8. Khan, M. J., Abbas, Q., & Hussain, M. (2024). *Comparative study of supervised learning techniques for sentiment classification*. Computers, Materials & Continua, 78(1), 1–16. https://doi.org/10.32604/cmc.2023.043301

9. Aliman, N. M., Mustaffa, M., Jambari, H., & Jusoh, M. S. (2022). *Performance evaluation of supervised learning algorithms for sentiment analysis: A comparative study*. Journal of Engineering and Applied Sciences, 17(5), 143–150.

10. Lu, W., Wang, J., Wang, Y., Zhou, Y., & Qin, H. (2021). *Sentiment analysis of social media texts with deep learning models and attention mechanism*. Information, 12(10), 392. https://doi.org/10.3390/info12100392

11. Wabang, G. S., Ahmad, T., & Wijaya, D. E. (2022). *Application of the Naive Bayes Classifier Algorithm to Classify Community Complaints*. Journal of Physics: Conference Series, 2180(1), 012045. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2180/1/012045

12. Rhohmawati, A., Sari, R. F., & Puspitasari, R. (2019). *Sentiment analysis using maximum entropy for Shopee reviews*. In 2019 4th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE) (pp. 237–242). IEEE.

13. Kim, J., & Jeong, Y. (2019). *Sentiment classification using convolutional neural networks*. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 10(5), 303–308.

14. Tholusuri, H., Gadde, P. R., & Sista, S. R. (2019). *Sentiment analysis using LSTM with IMDB dataset*. In 2019 4th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES) (pp. 1192–1195). IEEE.

15. Roccabruna, S., Nesi, P., & Pantaleo, G. (2022). *A comparison of BERT-based models for sentiment analysis in social media*. Applied Sciences, 12(6), 3016. https://doi.org/10.3390/app12063016

16. Prytula, Y. (2024). *Evaluation of transformer-based models for sentiment analysis of Ukrainian texts*. Proceedings of the International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS), 2024.

17. Kheiri, M., & Karimi, M. (2023). *SentimentGPT: Prompt-based sentiment analysis using generative pre-trained transformers*. Journal of Big Data, 10, Article 42. https://doi.org/10.1186/s40537-023-00708-4

18. Riaz, S., Fatima, M., Kamran, M., & Nisar, M. W. (2019). Opinion mining on large scale data using sentiment analysis and k-means clustering. Cluster Computing, 22, 7149–7164.

19. Andriyani, F., & Puspitarani, Y.. (2022). Performance Comparison of K-Means and DBScan Algorithms for Text Clustering Product Reviews. *Sinkron : Jurnal Dan Penelitian Teknik Informatika*, *6*(3), 944–949. https://doi.org/10.33395/sinkron.v7i3.11569

20. Xue, J., Chen, J., Chen, C., Zheng, C., Li, S., & Zhu, T. (2020). Public discourse and sentiment during the COVID-19 pandemic: Using Latent Dirichlet Allocation for topic modeling on Twitter. PloS one, 15(9), e0239441.

21. Riaz, S., Fatima, M., Kamran, M., & Nisar, M. W. (2019). Opinion mining on large scale data using sentiment analysis and k-means clustering. Cluster Computing, 22, 7149–7164.

22. Andriyani, F., & Puspitarani, Y.. (2022). Performance Comparison of K-Means and DBScan Algorithms for Text Clustering Product Reviews. *Sinkron : Jurnal Dan Penelitian Teknik Informatika*, *6*(3), 944–949. https://doi.org/10.33395/sinkron.v7i3.11569

23. Xue, J., Chen, J., Chen, C., Zheng, C., Li, S., & Zhu, T. (2020). Public discourse and sentiment during the COVID-19 pandemic: Using Latent Dirichlet Allocation for topic modeling on Twitter. PloS one, 15(9), e0239441.

УДК 004.89 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.24

М. М. КОРАБЛЬОВ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0005-2540-7741

І. В. КОБЗЕВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри мультимедійних систем і технологій
Харківський національний економічний університет
імені Семена Кузнеця
ORCID: 0000-0002-7182-5814

Д. О. АНТОНОВ
аспірант кафедри комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0000-2079-3413

ВИКОРИСТАННЯ ЕВОЛЮЦІОНУЮЧОЇ ГРАФОВОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЦІН НА ФОНДОВОМУ РИНКУ

Прогнозування цін на акції має важливе значення для ухвалення обґрунтованих інвестиційних рішень на фінансовому ринку. Аналіз рухів фінансового ринку та поведінки цін на акції надзвичайно складний через динамічну, нелінійну, нестаціонарну, непараметричну та хаотичну природу ринків. Для аналізу акцій з метою прогнозування фінансового ринку використовуються різні підходи. Традиційні методи, що засновані на інформації про часові ряди для акцій однієї компанії, не враховують взаємозв'язки між акціями інших компаній. Використання для цих цілей графових нейронних мереж (Graph Neural Networks – GNN), у яких взаємозв'язки часових рядів представлені як структура графа, а змінні представлені як вузли графа, значно підвищує точність прогнозування. Існуючі методи прогнозування зазвичай припускають, що структура графа взаємозв'язків, яка описується матрицею відносин та визначає метод агрегації графової нейронної мережі, фіксована за визначенням. Тому вони не можуть ефективно враховувати динамічні зміни у графах взаємозв'язків. У даній роботі для прогнозування цін акцій на фінансовому ринку пропонується використання еволюціонуючої графової нейронної мережі. Для отримання динамічних кореляцій між рухами цін у фінансових часових рядах будується граф взаємозв'язків у вигляді кластерів, генерація та еволюція структури та параметрів якої реалізуються з використанням дендритної штучної імунної мережі (Dendritic Artificial Immune network – DaiNet). До кожного згенерованого кластера графа взаємозв'язків для визначення цінової інформації виконується кодування цін за допомогою трансформерів. Потім повідомлення із структури графа взаємозв'язків та вхідні часові послідовності агрегуються на основі використання шару уваги часового графа. На останньому шарі GNN виконується остаточний прогноз майбутнього руху ціни кожної акції з використанням багатошарового персептрона. Проведені експериментальні дослідження показали, що використання динамічної побудови графів та кластеризації акцій на основі DaiNet не лише відстежує часовий характер зв'язків між акціями, але й покращує ефективність прогнозування.

Ключові слова: *прогнозування, фінансовий ринок, акції, взаємозв'язок, граф зв'язків, еволюція, графова нейронна мережа, штучна імунна мережа.*

M. M. KORABLYOV
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Computer Intelligent Technologies
and Systems
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0005-2540-7741

I. V. KOBZEV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Multimedia Systems and Technologies
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics
ORCID: 0000-0002-7182-5814

D. O. ANTONOV
Postgraduate Student at the Department of Computer Intelligent Technologies and Systems
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0000-2079-3413

USING AN EVOLVING GRAPH NEURAL NETWORK FOR PRICE FORECASTING ON THE STOCK MARKET

Stock price forecasting is essential for making informed investment decisions in the financial market. Analyzing financial market movements and stock price behavior is extremely complex due to the dynamic, nonlinear, non-stationary, non-parametric, and chaotic nature of markets. Various approaches are used to analyze stocks for the purpose of financial market forecasting. Traditional methods based on time series information for stocks of one company do not take into account the relationships between stocks of other companies. The use of graph neural networks (GNN) for this purpose, in which time series relationships are represented as a graph structure and variables are represented as graph nodes, significantly improves the accuracy of forecasting. Existing forecasting methods usually assume that the structure of the relationship graph, which is described by the relationship matrix and determines the aggregation method of the graph neural network, is fixed by definition. Therefore, they cannot effectively account for dynamic changes in the relationship graphs. In this paper, the use of an evolving graph neural network is proposed for forecasting stock prices in the financial market. To obtain dynamic correlations between price movements in financial time series, a cluster-based relationship graph is constructed, the generation and evolution of the structure and parameters of which are implemented using a dendritic artificial immune network (DaiNet). For each generated cluster of the relationship graph, price coding is performed using transformers to determine price information. Then, messages from the relationship graph structure and input time sequences are aggregated based on the use of the attention layer of the time graph. The final forecast of the future price movement of each stock is performed at the last layer of the GNN using a multilayer perceptron. Experimental studies have shown that the use of dynamic graph construction and stock clustering based on DaiNet tracks the temporal nature of the relationships between stocks and improves forecasting performance.

Key words: *forecasting, financial market, stocks, relationship, connection graph, evolution, graph neural network, artificial immune network.*

Постановка проблеми

Моделювання багатовимірних часових рядів (Multivariate Time Series – MTS) відіграє важливу роль у сучасних інтелектуальних системах. Однак точне прогнозування MTS все ще залишається складним завданням через можливу наявність прихованих змінних кореляцій як усередині часових рядів, так і між ними. Здатність прогнозувати ціни на акції є важливою для прийняття обґрунтованих інвестиційних рішень на фінансовому ринку.

Для вирішення задачі прогнозування фінансового ринку використовуються різні підходи: статистичні методи, розпізнавання образів, графіки, машинне навчання тощо. Традиційні методи навчання розглядають часові ряди змін акцій як незалежні та рівномірно розподілені відносно один одного, що не збігається з реальною ситуацією на фінансовому ринку. Наприклад, дві акції в одному секторі можуть мати вищу кореляцію, ніж акції в різних сферах. Ефект зв'язку на фінансовому ринку, де на ціни акцій впливають ціни пов'язаних акцій, вимагає використання більш повних даних. Врахування взаємозв'язків між акціями може підвищити ефективність прогнозування цін акцій.

Для обробки нелінійних залежностей використовуються методи глибокого навчання. Одними з перших моделей прогнозування MTS на основі глибокого навчання були LSTNet та TPA-LSTM [1], які поєднують згорткову нейронну мережу (CNN) та рекурентну нейронну мережу (RNN) для вилучення як внутрішньо-, так і міжчасових залежностей. Останнім часом для прогнозування MTS ефективно використовуються GNN, в яких взаємодії часових рядів представлені як структура графа зв`язків, а змінні представлені як вузли графа [2]. Існуючі методи прогнозування зазвичай припускають, що структура графа зв'язків, яка описується матрицею відносин та визначає метод агрегації графової нейронної мережі, є фіксованою (статичною) за визначенням і будується або вручну експертом, або за допомогою обробки природної мови (Natural Language Processing – NLP), або є самонавчальною.

Використання методів NLP для прогнозування стикається зі значними труднощами у виведенні зв`язків з високою точністю. Крім того, зв`язки можуть динамічно змінюватися з часом. Існуючі методи прогнозування цін на акції, що засновані на навчанні графів, є неоптимальними в динамічно мінливих ситуаціях. Щоб зробити GNN гнучкою та практичною структурою, необхідно моделювати в ній еволюціонуючі взаємодії часових рядів, тобто одночасно фіксувати попарні кореляції та часову залежність.

Таким чином, методи прогнозування цін на акції, які припускають фіксовану структуру графа зв'язків, мають низьку точність прогнозування. У реальних застосуваннях взаємодія змінних є динамічною та еволюційною. Крім того, взаємодія часових рядів у різних часових масштабах також може бути різною. Оскільки у реальних даних MTS кореляції з часом змінюються, то прогнозування з використанням статичного графа зв`язків може призвести до значних зміщень.

Таким чином, розробка моделі прогнозування цін акцій на фондовому ринку на основі еволюціонуючої графової нейронної мережі, яка враховує зміни взаємозв'язків між акціями, є актуальним завданням, яке може підвищити точність прогнозування цін на акції.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій

Методи прогнозування MTS можна розділити на дві категорії: а) методи, засновані на неявній залежності; та б) методи, засновані на структурній залежності. У першій категорії методів, одним із репрезентативних методів якої є LSTNet [1], залежність змінних фіксується за допомогою згортки над змінними. У другій категорії методів кореляція змінних представлена у вигляді графів зв'язків, а прогнозування реалізується за допомогою GNN.

Як відомо, різні фактори фінансового ринку суттєво впливають на зміни цін на акції. В існуючих дослідженнях найпоширенішим підходом є ручна побудова різних факторів як вхідних функцій [3]. Так, ринкові дані інтегруються з фундаментальними та технічними індикаторами акцій для прийняття рішень. У [4] встановлюється зв'язок між новою інформацією та пов'язаними об'єктами для прогнозування руху цін на акції.

Щоб вивчити послідовні приховані особливості історичної інформації та застосувати їх до задачі прогнозування, більшість існуючих методів використовують рекурентні нейронні мережі та їх варіанти, такі як LSTM та GRU [5]. Однак ринкові дані для кожної акції обробляються незалежно, що не враховує внутрішні зв'язки між акціями, що призводить до низької точності прогнозування та низької продуктивності. Інформація про кореляцію акцій використовується як вхідні дані для моделі прогнозування, але динамічні зміни у зв'язках між акціями не реєструються автоматично.

У [6] зазначається, що зміни цін на акції пов'язані не лише з їхніми історичними цінами, але й з акціями інших компаній, а для зберігання та представлення цих зв'язків використовуються графи знань. Для ефективного навчання на графічно структурованих даних у [7] пропонується використовувати графову нейронну мережу (GNN), яка показала високу продуктивність у різних сферах. Зв'язки між компаніями моделюються в графах знань, а для прогнозування змін цін на акції використовуються графові згорткові мережі. У [8] для вивчення кореляцій між компаніями використовується графова нейронна мережа уваги. Слід зазначити, що GNN, побудовані за допомогою цих методів, обмежені фіксованими, попередньо визначеними зв'язками між компаніями, які підтримуються за допомогою ручного редагування або методів обробки природної мови.

У [9] Graph Wavenet використовується для вивчення кореляції змінних часових рядів за допомогою статичного представлення вузлів та захоплення часової закономірності за допомогою згорткових нейронних мереж (CNN). Також вивчається статична кореляція змінних часових рядів, але для прогнозування MTS запропоновано новий модуль згортки графів. Динамічний зв'язок між змінними в [10] моделюється за допомогою механізмів самоуваги, але побудовані GNN дуже чутливі до вхідних даних, що призводить до значної дисперсії в прогнозуванні.

У [11] запропоновано гібридну модель аналізу акцій, яка використовує комбінацію різних інтелектуальних технологій: рекурентних нейронних мереж (RNN) для отримання характеристик ціни акцій, штучних імунних систем (AIS) для отримання інформації про взаємозв'язок між акціями та графових нейронних мереж (GNN) для оцінки прибутковості акцій. Але структура згенерованого графа взаємозв'язку також фіксована.

У деяких роботах досліджуються графові структури, які змінюються з часом. Однак ці графові структури не безпосередньо відповідають задачі прогнозування, що може призвести до упереджених результатів. У [12] для прогнозування MTS використовуються трансформери, але вони не повністю враховують питання динамічної залежності змінних. Однак у реальних умовах корпоративні відносини змінюються з часом, і графи відносин, що їх описують, можуть бути неоднорідними, тобто між компаніями може існувати кілька типів відносин.

Таким чином, існуючі методи не дозволяють повною мірою використовувати всю інформацію з реальних графів взаємозв'язків компаній.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є побудова еволюціонуючої графової нейронної моделі для аналізу акцій фінансового ринку, яка б інтегрувала інформацію про зміни цін на акції з часом та взаємозв'язки між ними, а також підвищила точність їх прогнозування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розглянемо архітектуру запропонованої нейронної мережі на основі часового графу та її компоненти (рисунок 1), яка використовується для прогнозування цін на акції на фінансовому ринку.

Спочатку, на основі вхідних часових рядів характеристик торгівлі акціями, генерується граф взаємозв'язків між акціями компаній з виділеними кластерами, який визначає динамічні взаємозв'язки на ринку для кожного торгового дня. Потім ціни кодуються за допомогою трансформерів, які вибирають центральні часові вузли кластерів та їхні сусідні вузли для визначення цінової інформації для кожного згенерованого кластера графа взаємозв'язків. Далі виконується агрегація повідомлень зі структури графа взаємозв'язків та вхідних часових послідовностей на основі використання шару уваги часового графа, який адаптивно розраховує важливість сусідів та агрегує інформацію за важливістю сусідів.

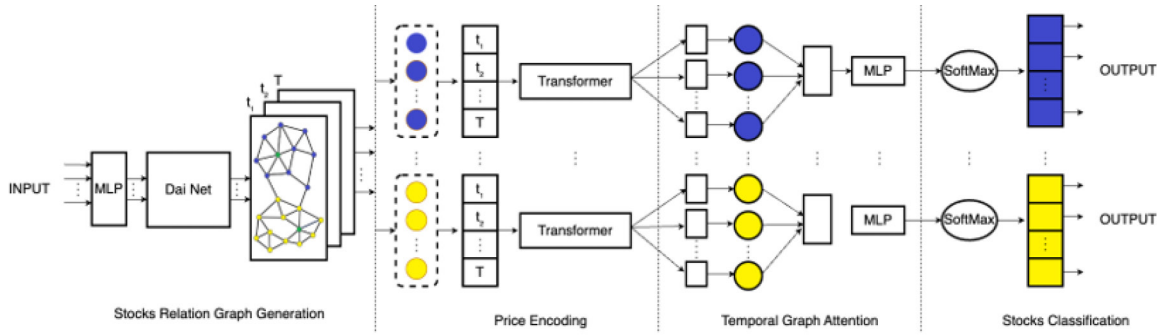


Рис. 1. Архітектура нейронної мережі на основі часового графу

В останньому шарі GNN виконується остаточний прогноз майбутнього руху ціни кожної акції за допомогою багатошарового персептрона (MLP) для інтеграції вищезазначених компонентів. Використання повністю зв'язаних шарів дозволяє моделі агрегувати витягнуті ознаки часового ряду, що спрощує процес прогнозування. Останній шар з функцією активації SoftMax використовується для виведення ймовірностей прогнозування майбутнього руху кожної акції. Розглянемо детальніше реалізацію цих етапів.

Створимо GNN для вилучення динамічних кореляцій між змінними з часових рядів для вирішення задачі прогнозування ціни акцій. Часові ряди в аналізі фінансового ринку – це хронологічні набори спостережень, такі як щоденні результати продажів та ціни акцій компаній. Використаємо набори спостережень для створення часових графів відносин компаній для кожного торгового дня. Вхідними даними багатошарового персептрона (MLP) є часові ряди торгових характеристик акцій $X = (X^{(1)}, X^{(2)}, \ldots, X^{(t)}, \ldots, X^{(T)})$, $X \in R^{N_x T_x n}$, де N – кількість акцій, T – довжина часового ряду, n – розмірність акції. На виходах MLP отримуємо характеристики (представлення) цін акцій кожного часового ряду $P_t^i = (p_1^i, p_2^i, \ldots, p_t^i, \ldots, p_T^i)$, $i = \overline{1, N}$ для торгового дня t:

$$P_t^i = \theta_t(X_t^i), \tag{1}$$

де θ_t – функція перетворення.

Виходи MLP P_t^i далі використовуються для визначення відносин між акціями для кожного торгового дня t у вигляді часових графів, які представлені матрицями відносин:

$$A_t^i = £_t(P_t^i), \tag{2}$$

де $£_t$ – функція формування матриць відносин.

Таким чином, часові графи для кожного торгового дня представлені набором взаємопов'язаних вузлів та ребер $G = \{V, E\}$ з часовими мітками, де V та E вказують на набір вузлів та ребер відповідно. Ребро $e_{ij} \in E$ графа може бути представлене впорядкованим кортежем $\{v_i, v_j\}$, який вказує на точки ребер від вузла v_i до вузла v_j. Графи взаємозв'язків компаній розглядаються як набори часових графів, що автоматично генеруються на основі історичних цінових послідовностей, i в яких вузли $V = \{V_{t_1}, V_{t_2}, \ldots, V_T\}$ позначають компанії, а ребра $E = \{E_{t_1}, E_{t_2}, \ldots, E_T\}$ представляють їхні зв'язки. Кожен вузол V_{t_i} у різні торгові дні t_i може бути пов'язаний зв'язками з кількома ребрами E_{t_i} з часовими мітками. У цьому випадку характеристики вузлів V_{t_i} та ребер E_{t_i} у різні торгові дні t_i можуть бути різними.

Як зазначалося, зв'язки між змінними графа не лише змінюються з часом, але й змінюються в різних часових масштабах, що ускладнює опис таких кореляцій за допомогою фіксованої матриці зв'язків. Крім того, моделі розвитку структури графа також неоднакові в різних часових масштабах. Таким чином, існують проблеми, які необхідно вирішити:

1. Структура графа взаємозв'язків змінюється з часом. Більшість існуючих робіт використовують фіксовану та статичну матрицю суміжності від початку до кінця, яка, очевидно, не може впоратися з такою умовою.
2. Структура графа взаємозв'язків змінюється залежно від різних шкал спостереження. Кореляція між змінними в короткостроковій перспективі може відрізнятися від довгострокової. Наприклад, у короткостроковій перспективі дві акції можуть одночасно зростати та падати, коли змінюється фінансова політика, але в довгостроковій перспективі вони можуть розходитися, якщо одна компанія процвітає, а інша збанкрутує. Використання фіксованої матриці взаємозв'язків також не впорається з цією умовою.

Для визначення зв'язків між змінними за певні часові інтервали згенеруємо структуру графа з еволюціонуючими зв'язками. Завдання визначення зв'язків між акціями компаній можна вважати завданням кластеризації, яке забезпечує своєчасний та адекватний спосіб отримання кореляцій між акціями для кожного торгового дня. Сьогодні широке поширення набули методи кластеризації, що використовують біологічні принципи організації обчислень, зокрема, штучні імунні системи.

Для вирішення проблеми кластеризації акцій пропонується використовувати модель дендритної штучної імунної мережі (DaiNet) [13], яка дозволяє сформувати K-зв'язний граф. Вершини графа – це антитіла, що описують характеристики цін на акції компаній, а ребра – спорідненість, що визначає ступінь зв'язності між ними. Формування DaiNet – це багатоетапний процес оптимізації, спрямований на зменшення кількості зв'язків між антитілами та використання для цього значень спорідненості та авідності [13]. DaiNet дозволяє автоматизувати та спростити процес формування графа зв'язків між акціями компанії. Результатом кластеризації буде мережа антитіл з певними кластерами, які для торгового дня t представлені еволюціонуючим графом навчання, що описується матрицею зв'язків $A^{(t)}$. Параметри матриці зв'язків $A^{(t)}$ для торгового дня $(t + 1)$ залежать від змін торгових характеристик акцій $X^{(t)}$ та параметрів матриці $A^{(t)}$ для торгового дня t:

$$A^{(t+1)} = Q(A^{(t)}, X^{(t)}), \tag{3}$$

де Q – функція, що визначає еволюцію GNN.

Слід зазначити, що кореляції між багатовимірними часовими рядами в практичних задачах змінюються з часом, отже, характеристики вузлів та дуг графа відносин акцій компаній також підлягають змінам при переході від одного торгового дня до іншого. Тому, щоб GNN мала еволюційні властивості, що враховують зміну кореляцій як у межах, так і між часовими рядами акцій компаній, необхідно генерувати відповідні матриці співвідношень $A^{(t)}$ для послідовності торгових днів, що підвищить точність прогнозування.

З кожного згенерованого кластера графа взаємозв'язків G вибираються центри кластерів та їхні сусідні вузли, а інформація про рух ціни кодується у часові представлення за допомогою конвертера-кодера. Вхідна характеристика руху цінових послідовностей акцій у торговий день t визначається як $X = (X^{(1)}, X^{(2)}, \ldots, X^{(t)}, \ldots, X^{(T)})$, $X \in R^{N_x T_x n}$, де N – кількість акцій, n – розмірність акцій, T – кількість торгових днів. Щоб отримати вхідний тензор $H^{(t)} \in R^{N_x T_x n}$ акцій, використовується лінійне перетворення для торгових характеристик

$$H_i^{(t)} = F_i X^{(t)} + a_i, \tag{4}$$

де $F_i \in R^{N_x n}$ та $a_i \in R^N$ – параметри навчання. Таким чином, для кодування цінової інформації вибираються центри кластерів та сусідні з ними вузли.

Враховуючи вихідні послідовності вузлів кодера $V_i^{(t)}$ та часовий граф відносин $G^{(t)} = \{V^{(t)}, E^{(t)}\}$ для кожного торгового дня t, для агрегації повідомлень на послідовних входах був використаний механізм уваги до графів. Для агрегації повідомлень зі структур графів відносин та вхідних часових послідовностей виконується згладжування вбудованих вузлів та використовується двоетапний механізм часової уваги. Двоетапні шари часової уваги обчислюють важливість сусідів, агрегують повідомлення відповідно до їх важливості та одночасно агрегують повідомлення з усіх кластерів графів відносин. Агрегація повідомлень реалізується наступним чином:

$$S_r^{(t)} = AL_r \cdot P_{0,r}, \tag{5}$$

де $S_r^{(t)} \in R^{n_x N}$ – вихід шару уваги часового графіка у торговий день t, $P_{0,r}$ – вихідна матриця проекції, AL_r – вершина шару уваги часового графа, яка описується наступним чином:

$$AL_r = \sum_j \sigma \cdot \left(\sum_i (p_{i,j} \cdot h_i) \right), \tag{6}$$

де σ – сигмоїдна функція активації, h_i – i-й рядок вбудовування ціни, $p_{i,j}$ – важливість часової межі (i, j) в i-й вершині графа, яка визначається за допомогою функції активації ReLU. Таким чином, використання шару уваги графа дозволяє адаптивне обчислення важливості сусідів у графі зв'язків та агрегування інформації відповідно до їхньої важливості.

Останній шар GNN, використовуючи багатошарове сприйняття з функцією активації виходу SoftMax, виконує ймовірнісний прогноз майбутнього руху ціни кожної акції. Використання перехресної ентропії як функції втрат у цій задачі дозволяє моделі оптимізувати свої ваги таким чином, щоб максимізувати прогнозовані ймовірності фактичних позначок результуючих класів. Це забезпечує більш точне та надійне прогнозування цін на акції на фінансовому ринку за допомогою глибокого навчання та GNN. Вузли в повністю зв'язаному шарі з'єднані з усіма вузлами попереднього шару, що дозволяє ефективно комбінувати та класифікувати ознаки, витягнуті з попередніх етапів обробки, та спростити процес прогнозування.

Експериментальні дослідження

Експериментальні дослідження проводилися з акціями 16 відомих технологічних компаній: Apple (AAPL), Amazon (AMZN), Cisco (CSCO), Electronic Arts (EA), eBay (EBAY), Meta (META), Google (GOOG), IBM (IBM), Intel (INTC), Microsoft (MSFT), Netflix (NFLX), NVIDIA (NVDA), Oracle (ORCL), Qualcomm (QCOM), Tesla (TSLA) і Adobe (ADBE). Були отримані історичні дані про акції, включаючи щоденні ціни закриття, обсяги торгів та вибрані технічні індикатори, що охоплюють T торгових днів. На рисунку 2 показані графіки змін середньомісячних цін на акції 16 IT-компаній в період з січня 2023 року по березень 2025 року.

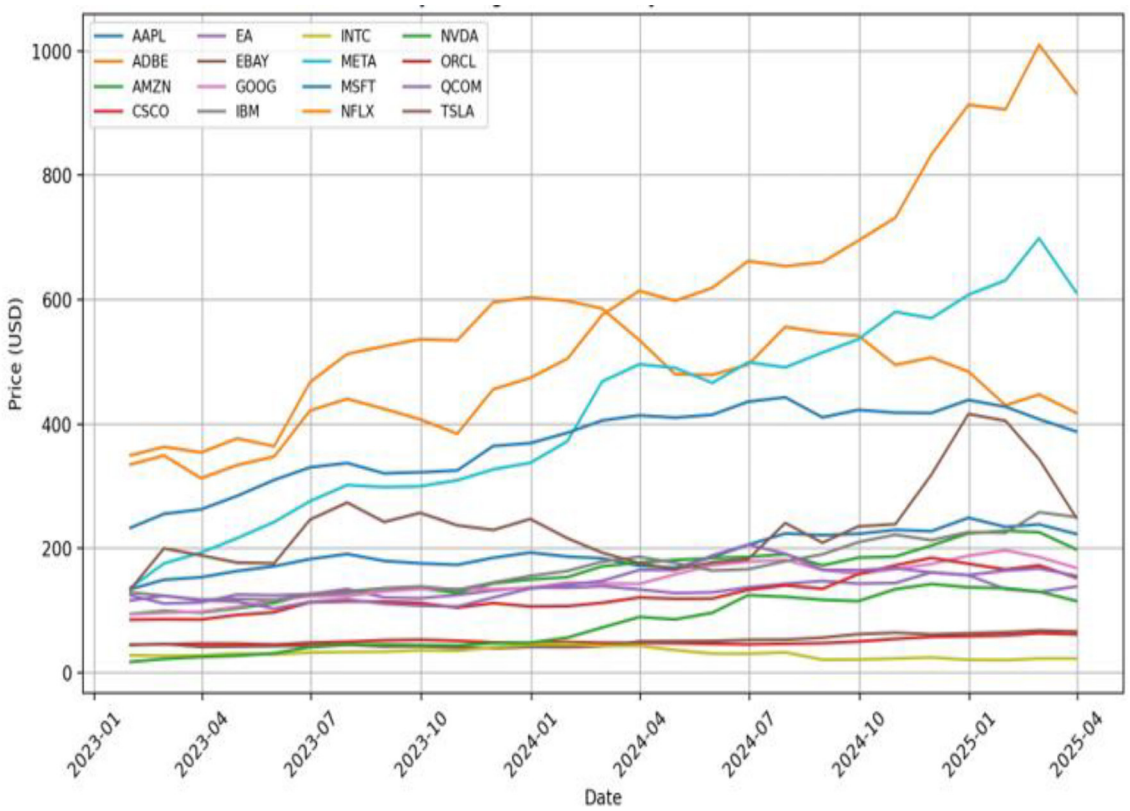


Рис. 2. Зміни середньомісячних цін на акції IT-компаній

Експериментальні дані про щодобові ціни на акції були поділені на три інтервали:

1) навчальна вибірка (1 січня 2022 р. – 1 липня 2024 р.);
2) перевірочна вибірка (1 липня 2024 р. – 1 січня 2025 р.);
3) тестовий набір (з 1 січня 2025 р. по 1 квітня 2025 р.).

Дані були попередньо оброблені наступним чином:

1. Нормалізація. Усі ознаки були нормалізовані за допомогою нормалізації z-оцінки для забезпечення порівнянного масштабу.
2. Генерація ковзного вікна. Для вхідного часового ряду було сформовано ковзне вікно тривалістю 20 торгових днів, що забезпечує кожну вибірку достатнім історичним контекстом для побудови часового графа.
3. Інженерія ознак: Окрім необроблених цінових даних, були обчислені та включені до набору ознак технічні індикатори, наприклад, ковзні середні.

Ці кроки дають змогу отримати багатовимірний набір даних часових рядів, який слугує основою для побудови часових графів.

Під час навчання нейронних мереж кількість ітерацій моделі було встановлено рівним 500. В якості характеристик акцій було взято шість типів денних торгових даних: ціна відкриття, ціна закриття, висока ціна, низька ціна, обсяг і швидкість обороту, оскільки вони типові, поширені та легко доступні.

Для визначення взаємозв'язків між акціями застосовано імунну модель DaiNet. Це дозволило отримати інформацію про акції технологічних компаній у вигляді графа (рисунок 3), вершини якого відображають характеристики часових рядів про акції, а дуги – відносини між ними.

Отриманий після кластеризації граф взаємозв'язків між акціями технологічних компаній вказав на створення трьох кластерів.

До першого кластеру ввійшли наступні компанії: Adobe, Amazon, EA, eBay, Intel, Meta, Netflix, центром кластера є компанія Meta. Компанії в цьому кластері мають високу позитивну кореляцію одна з одною, що вказує на те, що ціни на їхні акції мають тенденцію рухатися разом. Ці компанії можуть належати до технологічних або пов'язаних із технікою секторів, оскільки вони мають подібну ринкову динаміку та на них можуть впливати загальні галузеві тенденції.

До другого кластеру ввійшли наступні компанії: Apple, Cisco, Google, Microsoft, Nvidia, Oracle, Qualcom, Tesla, центром кластера є компанія Microsoft. Цей кластер складається з компаній, які мають позитивні кореляції одна з одною, але не такі сильні, як компанії в кластері 1. Ці компанії можуть належати до різних секторів, але мають спільні ринкові тенденції або мають взаємопов'язану динаміку бізнесу.

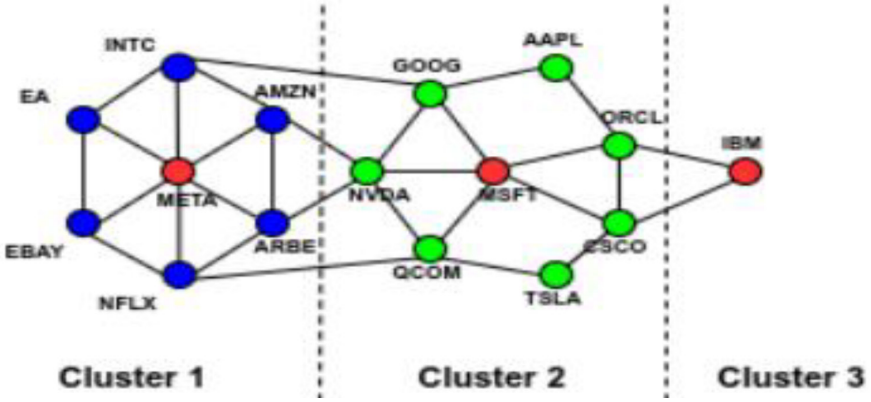


Рис. 3. Граф кластеризації технологічних компаній

До третього кластеру ввійшла компанія IBM, яка є єдиною компанією в цьому кластері, що вказує на те, що її взаємозв'язок з курсами акцій інших компаній у наборі даних відносно низький. Це може бути унікальним у своїй поведінці на ринку порівняно з іншими компаніями.

Для кожного торгового дня будується граф, в якому кожен вузол представляє окрему акцію, а межі встановлюються шляхом обчислення спорідненості між історичними рухами цін на акції (у ковзному вікні). До значень спорідненості застосовується поріг для створення матриці відносин. Цей процес фіксує взаємозалежності між акціями, що призводить до створення часового графа, який розвивається залежно від ринкових умов і гарантує побудову графа, що відображає зміну взаємозв'язків між акціями щодня.

Щоб створити граф відносин та виділити значущі підструктури, застосовується алгоритм DaiNet до кожного щоденного графа [13]:

1. Обчислення спорідненості. Для кожної пари вузлів спорідненість обчислюється як Манхеттенська відстань між їхніми векторами ознак. Поріг спорідненості NAT визначається як середня спорідненість для всіх пар вузлів.
2. Обрізання ребер. Ребра зі значеннями спорідненості нижче NAT обрізаються з графа. Це зменшує шум і підкреслює більш значущі зв'язки.
3. Визначення рівнів стимуляції та ідентифікація центрів кластерів. Для кожного вузла рівень стимуляції обчислюється на основі його спорідненостей. Вузли, що мають високі рівні стимуляції, позначаються як центри кластерів.
4. Призначення до кластерів на основі авідності: Решта вузлів призначаються до кластерів шляхом оцінки їхньої авідності – кількісного визначення сили зв'язку з кожним ідентифікованим центром.

Цей ітеративний процес призводить до розвитку кластерів, які динамічно відображають основні міжгрупові зв'язки. Кластеризація на основі DaiNet ефективно перетворює динамічний граф на набір когерентних підграфів, кожен з яких представляє кластер тісно пов'язаних акцій.

Реалізація моделі прогнозування була здійснена за допомогою Python. Ключові бібліотеки включають: Pandas та NumPy – для маніпулювання даними та попередньої обробки; Scikit-learn – для попередніх експериментів з кластеризації та оцінки мір подібності; PyTorch Geometric – для реалізації компонентів графової нейронної мережі; NetworkX та Matplotlib – для візуалізації еволюціонуючих графових структур.

Для кожного торгового дня часовий граф був побудований та кластеризований за допомогою описаних вище кроків. Отримані кластери служили вхідними даними для кодера на основі трансформера, який фіксував часові цінові характеристики. Ці характеристики, агреговані через рівень уваги часового графа, передавались до MLP для ймовірнісного прогнозування.

Експерименти виконувалися протягом 50 епох та були отримані результати у вигляді двох ключових метрик: середньоквадратична помилка прогнозування (RMSE) (рисунок 4) та точність прогнозування (рисунок 5).

Видно, що прогнозоване середньоквадратичне відхилення (RMSE) моделі графа, що еволюціонує, залишається меньшим, ніж у статичної моделі графа протягом усього навчання. Постійно менше середнє відхилення (RMSE) підкреслює перевагу фіксації динамічних зв'язків за допомогою структур графа, що еволюціонують.

Точність прогнозування руху показує, що обидві моделі покращуються з майже 50 % (випадкове вгадування) до значно вищого 55–65 %. Однак модель еволюціонуючого графа перевершує статичний підхід приблизно на 5–10 % у більшість епох, досягаючи піку близько 65 %. Загалом, ці результати вказують на перевагу використання динамічної кластеризації та часово-залежної графової уваги для більш точного та надійного прогнозування цін на акції.

Висновки

Використання графових нейронних мереж (GNN), в яких взаємозв`язки часових рядів представлені у вигляді графа, значно підвищує точність прогнозування. Однак в існуючих методах структура та параметри графа

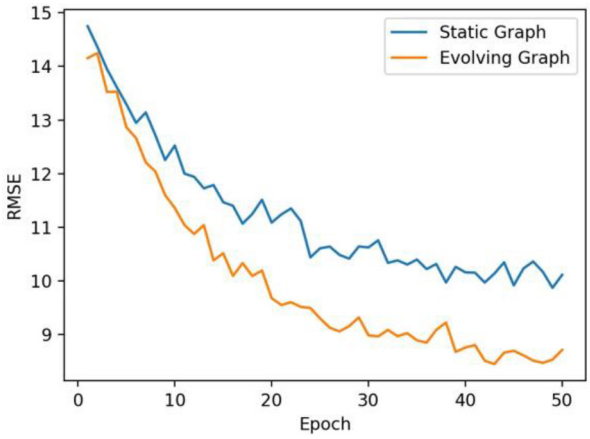


Рис. 4. Прогнозоване RMSE

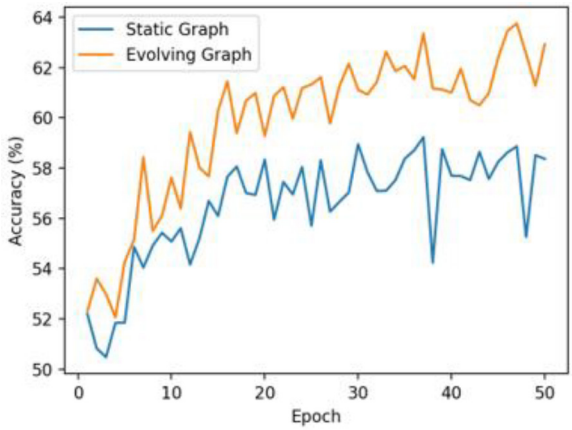


Рис. 5. Точність прогнозу

відносин фіксована за визначенням. У роботі для прогнозування цін акцій на фінансовому ринку використовується еволюціонуюча GNN, в якій генерація та еволюція її структури та параметрів, представлених у вигляді кластерів, реалізується за допомогою DaiNet. Вершини графа – це антитіла, що описують характеристики цін на акції компаній, а ребра – спорідненість, що визначає ступінь зв'язності між ними. Результатом кластеризації є мережа антитіл з певними кластерами.

Для визначення цінової інформації для кожного згенерованого кластера графа взаємозв'язків ціни кодуються за допомогою трансформерів. На основі використання шару уваги часового графа інформація агрегується за важливістю сусідів. Останній шар GNN, використовуючи багатошарове сприйняття з функцією активації виходу SoftMax, дозволяє отримати ймовірнісний прогноз майбутнього руху ціни кожної акції.

Проведені експериментальні дослідження показали, що використання динамічної побудови графів та кластеризації акцій на основі DaiNet не лише відстежує часовий характер зв'язків між акціями, але й покращує ефективність прогнозування. Для покращення характеристик аналізу акцій та прогнозування фінансового ринку плануються подальші дослідження щодо побудови еволюціонуючих неоднорідних у часі GNN.

Список використаної літератури

1. Shih S.-Y., Sun F.-K., and Lee H.-Y. Temporal pattern attention for multivariate time series forecasting. Machine Learning 108, 8, 2019, pp. 1421–1441. DOI: 10.48550/arXiv.1809.04206

2. Patel M., Jariwala K., and Chattopadhyay C. A Systematic Review on GNN-based Methods for Stock Market Forecasting. ACM Computing Surveys, Vol. 57, Iss. 2, Art. No 34, 2024, pp. 1–38. https://doi.org/10.1145/3696411

3. Cheng D., Yang F., Xiang S., and Liu J. Financial time series forecasting with multi-modality graph neural network. Pattern Recognition 121, 2022, 108218. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2021.108218

4. Li W., Bao R., Harimoto K., Chen D., Xu J., and Su Q. Modeling the Stock Relation with Graph Network for Overnight Stock Movement Prediction. In IJCAI, 2020, pp. 4541–4547. https://doi.org/10.24963/ijcai.2020/626

5. Jin Z., Yang Y., & Liu Y. Stock closing price prediction based on sentiment analysis and LSTM. Neural Computing and Applications, 32 (13), 2020, pp. 9713–9729. https://doi.org/10.1007/s00521-019-04504-2

6. Liu W., Zhang Y., Wang J., He Y., Caverlee J., Chan P., Yeung D.S., and Heng P.-A. Item Relationship Graph Neural Networks for E-Commerce. IEEE Transactions on NNLS, 2021, pp. 1–15. DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3060872

7. Wu Z., Pan S., Chen F., Long G., Zhang C., and Philip S.Y. A comprehensive survey on GNN. IEEE Transactions on NNLS, 32, 1, 2020, pp. 4–24. https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.00596

8. Sawhney R., Agarwal S., Wadhwa A., and Shah R. Deep Attentive Learning for Stock Movement Prediction from Social Media Text and Company Correlations. In Proceedings of the Conference on Empirical Methods in NLP, 2020, pp. 8415–8426. DOI: 10.18653/v1/2020.emnlp-main.676

9. Wu Z., Pan S., Long G., Jang J., and Zhang C. Graph wavenet for deep spatial-temporal graph modeling. arXiv preprint arXiv:1906.00121, 2019. https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.00121

10. Zhang Q., Chang J., Meng G., Xiang S., and Pan C. Spatio-temporal graph structure learning for traffic forecasting. In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, V. 34, 2020, pp. 1177–1185. DOI: 10.1609/aaai.v34i01.5470

11. Korablyov M., Fomichov O., Antonov D., Dykyi S., Ivanisenko I., and Lutskyy S. A hybrid stock analysis model for financial market forecasting. IEEE Proceedings of the 18th Intern. Confer. on Computer Science and Information Technologies, 2023, pp. 1–4. DOI: 10.1109/CSIT61576.2023.10324069

12. Xu M., Dai W., Liu C., Gao X., Lin W., Qi G. J., and Xiong H. Spatial-temporal transformer networks for traffic flow forecasting. ArXiv abs/2001.02908, 2020. https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.02908

13. Korablyov M., Fomichov O., Ushakov M., and Khudolei M. Dendritic Artificial Immune Network Model for Computing. Proceedings of the 7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (CoLInS 2023), 2023, pp. 206–217. https://ceur-ws.org/Vol-3403/

References

1. Shih S.-Y., Sun F.-K., and Lee H.-Y. (2019) Temporal pattern attention for multivariate time series forecasting. Machine Learning 108, 8, pp. 1421–1441. DOI: 10.48550/arXiv.1809.04206

2. Patel M., Jariwala K., and Chattopadhyay C. (2024) A Systematic Review on GNN-based Methods for Stock Market Forecasting. ACM Computing Surveys, Vol. 57, Iss. 2, Art. No 34, pp. 1–38. https://doi.org/10.1145/3696411

3. Cheng D., Yang F., Xiang S., and Liu J. (2022) Financial time series forecasting with multi-modality graph neural network. Pattern Recognition 121, 108218. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2021.108218

4. Li W., Bao R., Harimoto K., Chen D., Xu J., and Su Q. (2020) Modeling the Stock Relation with Graph Network for Overnight Stock Movement Prediction. In IJCAI, pp. 4541–4547. https://doi.org/10.24963/ijcai.2020/626

5. Jin Z., Yang Y., & Liu Y. (2020) Stock closing price prediction based on sentiment analysis and LSTM. Neural Computing and Applications, 32 (13), pp. 9713–9729. https://doi.org/10.1007/s00521-019-04504-2

6. Liu W., Zhang Y., Wang J., He Y., Caverlee J., Chan P., Yeung D.S., and Heng P.-A. (2021) Item Relationship Graph Neural Networks for E-Commerce. IEEE Transactions on NNLS, pp. 1–15. DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3060872

7. Wu Z., Pan S., Chen F., Long G., Zhang C., and Philip S.Y. (2020) A comprehensive survey on GNN. IEEE Transactions on NNLS, 32, 1, pp. 4–24. https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.00596

8. Sawhney R., Agarwal S., Wadhwa A., and Shah R. (2020) Deep Attentive Learning for Stock Movement Prediction from Social Media Text and Company Correlations. In Proceedings of the Conference on Empirical Methods in NLP, pp. 8415–8426. DOI: 10.18653/v1/2020.emnlp-main.676

9. Wu Z., Pan S., Long G., Jang J., and Zhang C. (2019) Graph wavenet for deep spatial-temporal graph modeling. arXiv preprint arXiv:1906.00121. https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.00121

10. Zhang Q., Chang J., Meng G., Xiang S., and Pan C. (2020) Spatio-temporal graph structure learning for traffic forecasting. In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, V. 34, pp. 1177–1185. DOI: 10.1609/aaai.v34i01.5470

11. Korablyov M., Fomichov O., Antonov D., Dykyi S., Ivanisenko I., and Lutskyy S. (2023) A hybrid stock analysis model for financial market forecasting. IEEE Proceedings of the 18th Intern. Confer. on Computer Science and Information Technologies, pp. 1–4. DOI: 10.1109/CSIT61576.2023.10324069

12. Xu M., Dai W., Liu C., Gao X., Lin W., Qi G. J., and Xiong H. (2020) Spatial-temporal transformer networks for traffic flow forecasting. ArXiv abs/2001.02908. https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.02908

13. Korablyov M., Fomichov O., Ushakov M., and Khudolei M. (2023) Dendritic Artificial Immune Network Model for Computing. Proceedings of the 7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (CoLInS 2023), pp. 206–217. https://ceur-ws.org/Vol-3403/

УДК 004.4 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.25

Р. І. КОРДЮК
аспірант кафедри комп'ютерних технологій
у видавничо-поліграфічних процесах
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0009-0008-6082-901X

МОДЕЛЬ ОПРАЦЮВАННЯ КОЛАЖІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Проведено аналіз існуючих онлайн-технологій (Photoshop Online, Canva, Pixlr Editor) та виявлено основні недоліки їхніх моделей, головним з яких є відсутність автоматичного зв'язку між контейнерами зображень. Це призводить до значних витрат часу на ручні налаштування, а також до можливих помилок у формуванні фінальної композиції колажу. Недоліки проявляються, зокрема, у порушенні композиційної цілісності при зміні розмірів одного чи кількох елементів колажу.

У роботі також виконано аналіз таких відомих алгоритмічних моделей: автоматичного вибору та компонування важливих ділянок зображень (AutoCollage), групування зображень на основі семантичних зв'язків (Correlation-Preserving Photo Collage), створення естетичних композицій через навчання з підкріпленням (Aesthetic Photo Collage with Deep Reinforcement Learning) та диференційованого компонування колажів на основі ймовірнісних дерев (SoftCollage).

Основою проведеного дослідження стала розробка та детальний опис алгоритмів реалізації функції handleMoving, яка застосовується для автоматичної адаптації елементів колажу при їх інтерактивному переміщенні та зміні розмірів користувачами. Розроблені алгоритми для трьох основних структурних компонентів: деревоподібної ієрархічної структури колажу (CollageTree), горизонтального розміщення елементів (CollageRow) та вертикального розміщення елементів (CollageColumn). Детально описано логіку роботи цих алгоритмів, наведено блок-схеми, що ілюструють алгоритмічні процеси переміщення, перерахунку розмірів та автоматичної адаптації елементів залежно від змін виконуваних користувачами. Проведено детальний аналіз розроблених алгоритмів, який показав високу ефективність навіть за умов масштабування колажів, які містять значну кількістю зображень. Функція handleMoving, яка розроблена в межах даного дослідження, може слугувати доповненням або розширенням згаданих алгоритмічних моделей, забезпечуючи автоматичне підтримання композиційної цілісності колажів під час їх інтерактивного редагування.

Ключові слова: *інформаційна система колажів, алгоритмічна модель, деревовидна структура, handleMoving, collageTree, collageRow, collageColumn.*

R. I. KORDIUK
Postgraduate Student at the Department of Computer Technologies
in Publishing and Printing Processes
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0009-0008-6082-901X

OPERATIONAL MODEL OF A COLLAGE INFORMATION SYSTEM

An analysis of existing online technologies (Photoshop Online, Canva, Pixlr Editor) identified significant shortcomings in their models, primarily the absence of automatic linkage between image containers. This results in substantial time spent on manual adjustments and potential errors in the final collage compositions. These issues particularly disrupt compositional integrity when resizing one or several collage elements.

The paper also analyzes known algorithmic models such as AutoCollage (automatic selection and arrangement of important image areas), Correlation-Preserving Photo Collage (grouping images based on semantic relationships), Aesthetic Photo Collage with Deep Reinforcement Learning (creating aesthetic compositions through reinforcement learning), and SoftCollage (differentiable collage composition based on probabilistic trees).

The fundamental contribution of this research is the development and detailed description of algorithms implementing the handleMoving function, designed for the automatic adaptation of collage elements during interactive repositioning and resizing by users. Algorithms were developed for three primary structural components: CollageTree (hierarchical tree structure of the collage), CollageRow (horizontal arrangement of elements), and CollageColumn (vertical arrangement of elements). The logic behind these algorithms is thoroughly described, accompanied by flowcharts illustrating the algorithmic processes of movement, size recalculations, and automatic adaptation of elements based on user actions. Detailed analysis of the developed algorithms demonstrated high efficiency, even when scaling collages containing a significant number of images. The handleMoving function, developed in this study, can complement or extend the aforementioned algorithmic models, ensuring automatic maintenance of compositional integrity during interactive collage editing.

Key words: *collage information system, algorithmic model, tree-like structure, handleMoving, collageTree, collageRow, collageColumn.*

Вступ

Відомо багато програмних та онлайн-засобів, що спрощують роботу із зображеннями та створення композицій на кшталт фотоальбомів чи колажів. Однак низка завдань залишається невирішеною. Одне з них – відсутність узгоджених, структурованих зв'язків між елементами графічних композицій (колажів). У популярних онлайн-сервісах для створення колажів, таких як Canva, Pixlr Editor, Online Photoshop, зміна одного фрагмента колажу не призводить до автоматичної зміни інших. Кожен контейнер зображення діє незалежно, тому після редагування розмірів одного елементу користувачу доводиться вручну коригувати сусідні елементи, щоб усунути накладання чи незбалансованість композиції. Це значно ускладнює редагування та знижує ефективність роботи.

У галузі автоматичного створення колажів постійно з'являються нові підходи, що мають на меті підвищити якість та швидкість генерації композицій. Автоматичне компонування фото-колажів розглядається як оптимізаційна задача: визначається функція якості композиції (наприклад, сумарна видима важливість областей фото), яку алгоритм намагається максимізувати. Такий підхід потребує значних обчислювальних ресурсів, і зі збільшенням кількості зображень генерація оптимального колажу стає складною задачею. Для підвищення ефективності розроблені різні алгоритми: від методів на основі розбиття полотна до оптимізації функцій композиції. Сучасні дослідження приділяють увагу використанню штучного інтелекту. Застосування ефективних алгоритмів оптимізації дозволило прискорити створення колажів у десятки і навіть сотні разів. З'явилися й принципово нові підходи: зокрема, методи глибокого навчання та підсиленого навчання для генерації колажів, які навчаються розташовувати зображення з високою естетичною якістю. Так, запропоновано моделювати процес створення колажу як послідовність дій агента у середовищі з винагородою за естетичний результат (Deep RL). Інші сучасні роботи фокусуються на побудові диференційованих моделей колажу: наприклад, метод SoftCollage формулює генерацію колажу як диференційований процес побудови деревовидної структури, що оптимізується градієнтними методами. Таким чином, актуальними є дослідження, спрямовані на підвищення гнучкості та автоматизації створення колажів, аби ефективно обробляти зростаючі обсяги візуальних даних.

Проблема узгодженого та ефективного редагування вже створених графічних композицій (колажів) залишається відкритою. Існуючі системи не забезпечують динамічної підтримки цілісності композиції при внесенні локальних змін. Це стимулює розробку нових моделей, які б дозволяли автоматично адаптувати пов'язані елементи колажу при редагуванні, спрощували процес внесення змін та підвищували ефективність роботи користувачів.

Постановка проблеми

Існуючі системи онлайн-редакторів колажів не забезпечують автоматичного узгодження положення і розмірів усіх елементів при перестановках. Зокрема, відсутність зв'язаності між елементами колажу ускладнює їх трансформацію: після переміщення одного зображення користувач змушений вручну налаштовувати сусідні елементи, щоб зберегти цілісність композиції. Це призводить до збільшення часу редагування та ризику порушення пропорцій. Обмеженням відомих моделей є також їх низька масштабованість: коли колаж містить десятки зображень, перебудова компоновки стає вкрай неефективною. Таким чином, проблема полягає в розробці моделей алгоритмів, які автоматично обробляють переміщення елементів у колажі будь-якого розміру, мінімізуючи кількість необхідних операцій і гарантують збереження структури колажу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для розв'язання проблеми варто розглянути наукові дослідження в галузі автоматичного створення колажів та практичні реалізації в існуючих системах.

Останні роки характеризуються активним розвитком алгоритмічних методів автоматизованого створення колажів, обумовлених широким застосуванням цього виду візуального контенту в соціальних мережах, рекламі та інших медіа. Дослідження в цій галузі можна умовно поділити на кілька ключових напрямків, а саме на: методи автоматичного компонування, алгоритми, що враховують семантичну кореляцію між зображеннями, а також інтеграції алгоритмів глибокого навчання.

Однією з перших популярних систем автоматизованого компонування стала AutoCollage, розроблена дослідниками з Microsoft Research. Система AutoCollage використовує алгоритм графового розрізу для визначення регіонів інтересу (ROI), які потім безшовно об'єднуються у фінальний колаж завдяки згладжуванню меж. Попри свою ефективність, даний алгоритм має недоліки, такі як збереження неінформативного фону та відсутність повноцінного аналізу семантичних зв'язків між зображеннями [9, с. 847].

З метою подолання цих обмежень розроблена система Correlation-Preserving Photo Collage. Автори використали глибокі нейронні мережі для визначення кореляцій між зображеннями, забезпечуючи семантично осмислене компонування. Це значно покращило сприйняття колажів завдяки близькому розташуванню пов'язаних зображень та компактному використанню простору полотна [6, с. 1956].

У роботі автори розробили модель компонування колажів із застосуванням глибокого навчання з підкріпленням (Deep Reinforcement Learning). У цій моделі агент послідовно розміщує зображення, отримуючи підкріплення за естетичні характеристики колажу, такі як компактність, пропорції та відсутність перекриттів. Це дозволило

значно поліпшити естетичну якість та ефективність створення колажів, забезпечивши більш природне і оптимальне компонування [11].

Перспективною стала диференційована модель SoftCollage [10], яка використовує ймовірнісне деревоподібне представлення для оптимізації компонування за допомогою градієнтних методів. Вона дозволила не тільки уникнути спотворень пропорцій зображень, але й забезпечити високу швидкодію завдяки диференційованій структурі дерева. За результатами експериментів модель продемонструвала високу ефективність у створенні компактних та семантично узгоджених колажів.

У роботі автори представили модель Variational Transformer Network (VTN), яка поєднує варіаційні автокодери (VAE) та трансформери для генерації макетів. Модель використовує алгоритми самоуваги для виявлення високорівневих взаємозв'язків між елементами макету, що дозволяє навчатися правилам дизайну, таким як відступи та вирівнювання, без явного нагляду. Ця модель забезпечує високу схожість з навчальними даними та різноманітність згенерованих макетів, досягаючи передових результатів у різних типах макетів, включаючи документи та інтерфейси користувача [12].

У дослідженні автори описали розроблену систему Iris, орієнтовану на користувача, яка забезпечує інтерактивне середовище для генерації графічних макетів з урахуванням множинних обмежень. Дизайнер може вказати певні обмеження, такі як вирівнювання елементів або залишення певних областей порожніми, після чого генеративна модель системи пропонує відповідні макети. Ця система підкреслює важливість контролю та інтерактивності в практичних умовах, дозволяючи дизайнерам швидко отримувати якісні пропозиції, які відповідають їхнім вимогам [13, с. 968].

У статті досліджується застосування штучного інтелекту для дизайну макетів постерів у візуальній комунікації. Автори розробили модель, що поєднує навчання та генерацію: «учень» використовує мережу просторового трансформера для класифікації елементів макету та створення початкового шаблону, а «генератор» вдосконалює цей шаблон, застосовуючи принципи дизайну, такі як золоте січення. Ця модель демонструє, як поєднання класичних правил дизайну з машинним навчанням може покращити якість макетів постерів [14, с. 2–6].

AutoPoster – це система, яка автоматично генерує рекламні постери, використовуючи вхідні дані, такі як зображення продукту та його назва. Модель функціонування системи проходить через кілька етапів: попереднє опрацювання зображення, генерація макету, створення тексту та налаштування стилю. Враховування контексту забезпечує гармонійне поєднання макету та тексту з зображенням продукту. Ця модель демонструє практичне застосування автоматизованого дизайну в рекламній індустрії, дозволяючи швидко створювати візуально привабливі матеріали [21].

Flowy – система, яка використовує мультимодальний штучний інтелект для аналізу великих колекцій існуючих інтерфейсів користувача та автоматично анотує дизайн-патерни в них. Вона ідентифікує загальні патерни інтерфейсу (наприклад, навігаційні панелі, карткові макети, форми реєстрації) та надає дизайнерам огляд цих патернів, їхніх цілей, переваг і недоліків, а також приклади застосування. Це допомагає дизайнерам приймати обґрунтовані рішення під час розробки багатосторінкових інтерфейсів, забезпечуючи узгодженість та покращуючи користувацький досвід [16].

У статті досліджується проблема автоматичного розташування декількох фотографій на заданому полотні з високою естетичною якістю. Існуючі методи в основному базуються на оптимізації ручних характеристик, які не можуть адекватно відобразити високо рівневі людські естетичні відчуття. Автори пропонують нову модель для автоматичної генерації колажів із заданим співвідношенням сторін, вперше впроваджуючи техніку глибокого навчання з підкріпленням у цю сферу. Щоб навчити агента покращувати як загальний макет, так і локальні деталі, функція винагороди спеціально розроблена для колажу, враховуючи суб'єктивні та об'єктивні фактори. Щоб подолати нестачу навчальних даних, вони попередньо навчають свою глибоку естетичну мережу на великому наборі даних з естетики зображень (CPC) для загального вилучення естетичних характеристик та пропонують модуль злиття уваги для представлення структурних характеристик колажу. Результати показують, що їхня модель перевершує інші моделі в оцінці естетичної якості, що підтверджується як об'єктивними метриками, так і суб'єктивними оцінками користувачів [10, с. 3720–3725].

Чао Й, Ма Й, Джоу Й. Та інші автори представили роботу «Composition-Aware Graphic Layout GAN for Visual-Textual Presentation Designs» на конференції IJCAI. Вони дослідили проблему генерації графічних макетів для візуально-текстових презентацій, зокрема рекламних постерів. Автори відзначили, що композиція зображення, яка включає як глобальну семантику, так і просторову інформацію, суттєво впливає на результати макету. Для вирішення цієї проблеми вони запропонували глибоку генеративну модель під назвою Composition-Aware Graphic Layout GAN (CGL-GAN), яка синтезує макети на основі глобального та просторового вмісту вхідних зображень. Щоб подолати розбіжність між навчальними та тестовими даними, автори розробили новий модуль вирівнювання доменів (Domain Alignment Module, DAM), який звужує цей розрив. Для навчання вони створили великий набір даних, що складається з 60 548 рекламних постерів з анотованою інформацією про макет. Запропонована модель продемонструвала здатність синтезувати високоякісні графічні макети відповідно до композицій зображень [15].

Джоу Й., Джинг К., Лі З. Та інші автори представили роботу «Element-Conditioned GAN for Graphic Layout Generation» на платформі SSRN. Вони відзначили, що існуючі генеративно-змагальні мережі (GAN) для генерації макетів не враховують ситуації, коли кількість та типи вхідних елементів дизайну є заданими та визначеними. Для вирішення цієї проблеми вони запропонували елементно-умовну генеративно-змагальну мережу (EcGAN) для генерації графічних макетів, обумовлених заданими елементами дизайну (кількість та типи елементів). Вони представили кожен елемент у вигляді обмежувальної рамки та запропонували три компоненти: маску елементів, функцію втрат для умов елементів та двоетапні дискримінатори, щоб вирішити проблему моделювання обмежувальних рамок для генерації макетів з урахуванням елементів. Експерименти показали, що EcGAN перевершує існуючі моделі як кількісно, так і якісно. Автори також продемонстрували два застосування EcGAN для практичних сценаріїв дизайну. Ці роботи підкреслюють постійний прогрес у застосуванні генеративних моделей, зокрема GAN, для автоматизації процесу дизайну графічних макетів, враховуючи як візуальні, так і текстові елементи, а також специфічні умови та обмеження, що робить їх більш адаптивними та корисними для практичних застосувань у графічному дизайні [21].

Сучасні онлайн-сервіси для редагування зображень, такі як Photoshop Online, Canva та Pixlr Editor, надають базові засоби створення колажів.

Система Photoshop Online (Adobe Photoshop, n.d.) базується на моделі у вигляді фіксованої сітки: користувач задає кількість рядків і колонок на полотні, після чого утворюється рівномірна решітка для розміщення зображень. Кожен доданий на полотно елемент міститься в прямокутному контейнері, що займає одну або кілька комірок сітки (рис. 1, *a*). Колаж формується розташуванням зображень у цих контейнерах (рис. 1, *b*). Основним недоліком такої моделі є відсутність зв'язку між контейнерами для яких зміна розмірів одного не впливає на сусідні.



a b

Рис. 1. Полотно із сіткою та контейнерами *a*, Колаж зображення *b*

Система Canva (Canva, 2025) реалізує схожу модель шаблонів в якій користувач обирає макет, що складається з декількох контейнерів для фото. Елементи шаблону також незалежні, і зміна, наприклад, висоти одного контейнера не приводить до автоматичного підлаштування інших. На рис. 2 показано приклад застосування системи Canva. Після збільшення висоти нижнього контейнера він наклався на три верхніх (рис. 2, *b*), оскільки між ними відсутній зв'язок, користувач мусить вручну зменшити висоту верхніх контейнерів (рис. 2, *c*).



a b c

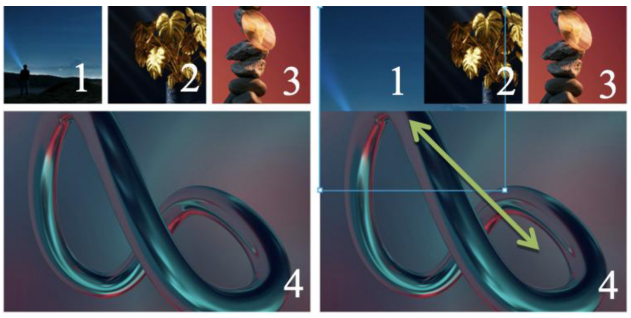
Рис. 2. Колаж в початковому вигляді *a*, накладання фрагментів зображень *b*, ілюстрація відсутності зв'язків між елементами колажа *c*

У системі Pixlr Editor (Online Photo Editor | Pixlr Editor, 2019) користувачу пропонуються готові моделі шаблонів різних компоновок або можливість самому додавати контейнери зображень. Цей редактор теж не забезпечує узгодженого масштабування: після зміни розміру одного контейнера інші залишаються фіксованими, що може спричинити накладання контейнерів. На рис. 3 показано приклад у Pixlr Editor: після збільшення висоти верхнього контейнера він наклався на верхній

та нижній контейнери (рис. 3, *b*), оскільки між ними відсутній зв'язок, користувач мусить вручну зменшити висоту контейнерів.

Загалом, усі три згадані системи (Canva, Pixlr, Photoshop Online) не мають алгоритмів автоматичного перерахунку розмірів та позицій сусідніх елементів при редагуванні (відповідні правки виконує користувач вручну) [3; 1]. Як наслідок, для внесення навіть відносно простої зміни композиції (наприклад, збільшення одного зображення) потрібно послідовно відредагувати декілька інших зображень, щоб відновити збалансований вигляд колажу. Це значно знижує продуктивність і зручність роботи з такими системами.

Наукові дослідження пропонують різні моделі автоматичного створення колажів, що можуть надати корисні ідеї для створення новітніх систем. Більшість моделей розглядають формування колажу як задачу оптимізації. Як зазначено вище, формується функція якості композиції, яка враховує певні критерії (мінімізація перекриття зображень, максимізація видимих важливих областей, естетичне розташування тощо). Далі моделями алгоритмів визначається таке розміщення зображень на полотні, яке оптимізує цю функцію. Проте пряма оптимізація для великої кількості елементів – NP-складна задача з величезним простором параметрів, тому практичні реалізації застосовують різні спрощення. Ранні роботи пропонували евристичні та генетичні моделі алгоритмів для підбору розміщення зображень у колажі. Інша група досліджень спрямована на покращення візуальної привабливості колажів – вводяться метрики естетики композиції і алгоритми оптимізують їх із залученням користувача. Наприклад, модель, описана у роботі авторів Джанг М., Лі М., та інших, використовує алгоритми глибокого навчання [11]. Система поступово розташовує зображення на канві, отримуючи винагороду за гармонійність композиції. Ця модель імітує процес ручного складання колажу, навчаючи агента вибирати наступний крок (обертання, масштаб, позицію чергового зображення) для покращення загальної якості. Отриманий таким чином колаж має збалансовану композицію з мінімумом порожнього простору.



a b

Рис. 3. Колаж в початковому вигляді *a*, ілюстрація зміни розмірів елемента колажа з № 1, та відсутності зв'язку між елементами з № 2, 3, 4 *b*

Окремо варто відзначити моделі з використанням деревовидних структур. Ідея полягає в рекурсивному розбитті області колажу на секції: наприклад, алгоритм SoftCollage конструює дерево, де кожен внутрішній вузол відповідає горизонтальному або вертикальному розбиттю області на підобласті, а листові вузли містять окремі зображення [10]. Таким чином формується ієрархічна структура «колаж-дерево». На відміну від моделей простих шаблонів, дерево дозволяє гнучкіше задавати макет. В роботі SoftCollage модель структури оптимізується нейронною мережею, яка навчається генерувати розбиття полотна, зберігаючи співвідношення сторін зображень і групуючи схожі за змістом зображення. Результати показали, що врахування структури колажу на рівні моделі дає змогу автоматично отримувати високоякісні композиції без сильних спотворень, з тематичним групуванням зображень.

Незважаючи на інтенсивний розвиток моделей на основі штучного інтелекту для автоматичного компонування графічних елементів [18; 20; 13], велика кількість практичних задач потребує детермінованих, контрольованих і передбачуваних алгоритмів редагування. Це особливо актуально у професійних і навчальних середовищах, де важлива точна ручна композиція з гарантованою підтримкою композиційної узгодженості.

У той час як сучасні генеративні моделі (наприклад, SoftCollage, EcGAN, AutoPoster) забезпечують високу якість автоматично згенерованих макетів, вони не надають засобів для інтерактивного редагування структури колажу після генерації, і найчастіше орієнтовані на одноразовий генеративний процес. Редагування вже створеної композиції, особливо з великою кількістю зображень, залишається поза їх можливостями.

Натомість деревовидна модель колажу, надає унікальні можливості автоматичного узгодження елементів композиції в процесі їхнього редагування користувачем. Завдяки гнучкій ієрархічній структурі (*CollageTree* → *CollageRow* → *CollageColumn* → *ImageContainer*) та алгоритмам типу *handleMoving*, будь-яка локальна зміна автоматично відображається на всіх пов'язаних елементах, зберігаючи композиційну цілісність і скорочуючи кількість необхідних дій у кілька разів.

Ця модель дозволяє подолати обмеження ручного редагування, яке наявне в таких інформаційних системах як Canva, Pixlr, Photoshop Online, де відсутній зв'язок між контейнерами, що вимагає багатоетапної ручної корекції кожного сусіднього елемента [1; 3; 8].

Формулювання цілі статті. Метою роботи є розробка та аналіз деревовидної моделі опрацювання колажів зображень. Зокрема, ставиться завдання створити алгоритм для базових компонентів моделі (*handleMoving*) і алгоритми вузла колажу (дерева), рядка колажу та стовпця колажу, які забезпечать автоматичне перевпорядкування елементів при їх переміщенні користувачем. Ціль полягає в тому, щоб мінімізувати кількість операцій при кожній перестановці і зберегти пропорції зображень та відступи між ними без ручного втручання. Досягнення цієї мети включає побудову блок-схем для візуалізації логіки алгоритмів та перевірку ефективності на граничних випадках. Очікується, що реалізація таких алгоритмів підвищить інтерактивність і продуктивність інформаційної системи опрацювання колажів, забезпечивши адаптивне реагування на дії користувача.

Виклад основного матеріалу

Архітектура деревовидної моделі колажу. Розроблена модель колажу організована у вигляді дерева (ієрархічної структури), що містить чотири рівні. Перший рівень – це кореневий елемент, який відповідає всьому колажу (полотну), як цілісному графічному об'єкту. Кореневий елемент має фіксовані загальні розміри колажу (наприклад, ширину і висоту), колір фону та інші глобальні параметри. На цьому рівні можна задавати відступи від країв полотна, а також, за потреби, рівномірне заокруглення кутів (коефіцієнт заокругленості) – початково він нульовий, але може динамічно змінюватися, якщо інтерфейс дозволяє закруглювати краї колажу. Другий рівень – це рядки колажу. Кореневий елемент містить рядків, розташованих вертикально один під одним, що формують вертикальну структуру колажу. Між кожною парою сусідніх рядків розташований горизонтальний повзунок рядка – інтерактивний роздільник, пересування якого змінює пропорції висот двох суміжних рядків. Таким чином, якщо – кількість рядків, на другому рівні буде рядків і горизонтальних повзунків. Третій рівень – вміст рядків. Кожен рядок може містити або контейнери зображень, розташованих горизонтально, або один чи більше під-рівнів у вигляді колонок. Якщо рядок містить безпосередньо контейнери зображень, то між ними розташовуються вертикальні повзунки секцій, що дозволяють змінювати їхні ширини. Нехай в рядку розміщено елементів (контейнерів зображень чи колонок) – тоді між ними буде вертикальних повзунків. Четвертий рівень – це випадок, коли на третьому рівні є колонки. Колонка являє собою додатковий рівень вкладеності всередині рядка. Вона містить контейнери зображень, розташовані вертикально, між якими вже присутні горизонтальні повзунки (аналогічні до повзунків між рядками). Тобто колонка фактично схожа на «рядок всередині рядка». Якщо в колонці зображень, між ними буде горизонтальних повзунків. Таким чином, колаж може містити і змішані структури: частина рядків складається безпосередньо з зображень, а частина – з колонок, які вміщують зображення. Загальний четвертий рівень – це контейнери зображень, які є листовими вузлами дерева (вони не містять інших елементів, а лише графічний вміст – власне зображення).

На рис. 4 показано приклад трирівневого колажу. кореневий елемент містить два рядки (перший і другий рівень), причому перший рядок має три контейнери зображень (№ 1, № 2, № 3) на третьому рівні, а другий рядок – один контейнер (№ 4). Між контейнерами 1, 2, 3 знаходяться вертикальні повзунки (розділювачі), а між першим і другим рядком – горизонтальний повзунок.



Рис. 4. Трьохрівневий колаж

Введені взаємозв'язки між усіма цими елементами утворюють складну і високо функціональну структуру. Кожна складова колажу «знає» про своїх сусідів і «батьківські» елементи та може впливати на них. Кожен елемент дерева в цій моделі є самостійним об'єктом, проте вони не ізольовані – між ними встановлені відносини «батько-нащадок» і «сусід-сусід». Завдяки цьому усі частини колажу утворюють єдину динамічну систему. Основний принцип функціонування моделі: внесені зміни в одному елементі автоматично та пропорційно відображаються на всіх інших пов'язаних з ним елементах. Це означає, що якщо користувач змінює розміри чи положення якогось контейнера, модель переобчислює розміри сусідніх контейнерів, а за потреби і батьківських елементів (рядків або колонок), щоб зберегти узгодженість структури. Така деревовидна структура уможливлює відповідну

поведінку через рекурсивні зв'язки: кожен вузол «знає» про сусідні вузли на тому ж рівні та про батьківський вузол і може повідомити їм про зміну. Описана модель є суттю алгоритмів пропорційного перерозподілу (функцій *handleMoving*). У межах моделі реалізовано спеціальні функції, що відповідають за опрацювання дій користувача при перетягуванні повзунків – умовно названі *handleMoving*.

Ключовим елементом функціонування описаної системи є алгоритм динамічного перерахунку розмірів при взаємодії користувача з роздільниками. В інтерактивному режимі, коли користувач пересуває повзунок, система повинна відповідно змінити розміри сусідніх областей колажу і, за необхідності, інших пов'язаних елементів. Цей процес реалізовано через функцію *handleMoving*, яка визначена для кожного типу контейнера (дерево, рядок, колонка) з урахуванням специфіки їх вкладеності. Нижче розглянуто алгоритми роботи *handleMoving* для різних рівнів структури.

Алгоритм handleMoving для CollageTree (кореневий рівень). Функція *CollageTree.handleMoving*() викликається при переміщенні горизонтального роздільника між рядками колажу. Нехай користувач пересунув даний роздільник на відстань Δy (вертикальне зміщення). Ця величина обчислюється як різниця між новою та старою ординатою повзунка:

$$\Delta y = y - y', \tag{1}$$

де y' – початкова ордината повзунка, y – теперішня ордината повзунка.

Перед початком перерахунку зберігаються початкові координати роздільника (*oldY*) та визначаються сусідні елементи: *previousEl* – рядок, що знаходиться безпосередньо над повзунком, і *nextEl* – рядок під повзунком. Алгоритм виконує такі кроки:

1. Перевірка граничних випадків. Якщо повзунок знаходиться над першим рядком (тобто немає попереднього елемента) або під останнім рядком (немає наступного елемента), то зміщення може бути застосоване лише в одному напрямку. У такому разі алгоритм виконує оновлення групи наявних рядків зверху або знизу, відповідно, розподіляючи зміщення між ними. Фактично, якщо повзунок у верхній межі, всі рядки нижче повзунка зсуваються вгору/вниз на Δy; якщо у нижній – всі рядки вище повзунка масштабуються.

2. Перевірка обмежень розміру. Перед застосуванням зміщення перевіряється, чи не стане висота будь-якого із сусідніх рядків або їхніх вкладених елементів надто малою (меншою за деякий мінімум, наприклад 50 px). Для цього аналізуються дочірні елементи *previousEl* та *nextEl*: якщо, скажімо, у попереднього рядка є вкладена колонка, всі її внутрішні зображення перевіряються на мінімальну висоту після потенційного зменшення. Якщо хоча б один елемент порушує обмеження (наприклад, всі зображення в колонці стали б менше 50 px заввишки), подальший рух повзунка блокується – функція *handleMoving* достроково завершується без змін, встановлюючи повзунок назад на попередню позицію. Таким чином гарантується збереження мінімально допустимих розмірів всіх частин колажу.

3. Оновлення розмірів сусідніх рядків. Якщо обмеження не порушені, виконується пропорційна зміна висоти двох сусідніх рядків, між якими рухається повзунок. Верхній рядок (*previousEl*) збільшується або зменшується на Δy, нижній (*nextEl*) – відповідно зменшується або збільшується на Δy (тобто один росте на ту величину, на яку інший втрачає). Формально, якщо H_{prev} та H_{next} – початкові висоти цих рядків, то після руху повзунка:

$$H'_{prev} = H_{prev} + \Delta y, \quad H'_{next} = H_{next} - \Delta y. \tag{2}$$

Позиції цих рядків по вертикалі також зсуваються: верхній зміщується на вниз (щоб залишатися центровано вирівняним у нових межах), а нижній – на $\Delta/2$ вгору.

4. Оновлення вкладених елементів. Рядки можуть містити вкладені колонки. При зміні висоти рядка необхідно скоригувати висоти внутрішніх контейнерів у колонках, щоб зберегти пропорції. Алгоритм проходить по кожному дочірньому елементу рядків *previousEl* та *nextEl*. Якщо якийсь елемент є колонкою (*CollageColumn*), то її вміст (набір зображень) перерозподіляється: здійснюється пропорційне збільшення або зменшення висот всіх вкладених зображень у колонці на величину Δy, поділену порівну між ними. Спеціально опрацьовуються випадки, коли висота окремих зображень у колонці досягла мінімуму – тоді така колонка більше не масштабується (це перевірено на кроці 2). У реалізації це відповідає виклику допоміжних методів *handleColumnBlockMove* та *handleColumnReverseBlockMove*, які розподіляють між дочірніми елементами колонки, що належать до верхнього та нижнього рядків, відповідно.

5. Відображення змін. Після оновлення числових параметрів висоти та позицій здійснюється рендеринг змін на полотні – викликається перерахунок координат всіх елементів колажу та перемальовування канви. Поточне значення позиції повзунка зберігається як його *oldY* для подальших взаємодій.

Алгоритм *handleMoving* на рівні *CollageTree* забезпечує узгоджене вертикальне масштабування компонувань колажу. Важливо, що зміна відбувається локально (між двома рядками), але завдяки рекурсивним зв'язкам ця зміна може вплинути і на глибші рівні (вкладені колонки та зображення), які були скориговані на кроці 4. Таким чином досягається *глобальна узгодженість*: колаж як єдина структура реагує на дію користувача без порушення цілісності макету.

Створений алгоритм *handleMoving* реалізований рекурсивно. Коли повзунок рухається, то система виконує такі дії:

- Визначає, які дві секції (або рядки) безпосередньо задіяні.
- Змінює їхні розміри відповідно до переміщення користувача, не виходячи за межі мінімумів/максимумів.
- Перевіряє граничні умови – якщо сусідня секція досягла мінімуму, рекурсивно викликає аналогічну операцію для наступної межі (повзунка) в напрямку руху.
- Оновлює розміри усіх пов'язаних елементів (наприклад, перераховує процентні співвідношення для дочірніх контейнерів у зміненому рядку або колонці).

Таким чином досягається автоматична адаптація композиції під час редагування.

Алгоритм *handleMoving* для *CollageRow* (горизонтальний рівень). Функція *CollageRow.handleMoving* відповідає за опрацювання переміщення вертикального повзунка всередині рядка, тобто зміну пропорцій сусідніх елементів по ширині. Припустимо, що в рядку є дві сусідні області – ліворуч (*previousEl*) і праворуч (*nextEl*) від повзунка. Нехай повзунок переміщено на величину Δx горизонтально (вправо – додатнє Δx, вліво – від'ємне). Значення Δx обчислюється аналогічно:

$$\Delta x = x - x', \tag{3}$$

де x' – початкова абсциса повзунка, x – теперішня абсциса повзунка. Алгоритм дій наступний:

1. Обмеження на краї рядка. Якщо повзунок пересувається з крайнього лівого положення (немає попереднього елемента) або крайнього правого (немає наступного елемента), то зміни ширини застосовуються до групи елементів з одного боку. Це крайні випадки, подібні до випадку з рядками: якщо повзунок біля лівого краю, всі елементи праворуч стискаються або розширюються на Δx; якщо біля правого – всі елементи ліворуч масштабуються на Δx. У реалізації використовується допоміжна функція *updateGroup* (Ψ) з відповідними параметрами.

2. Перевірка мінімальної ширини. Перед зміною розмірів перевіряється, чи залишиться достатня ширина у сусідніх елементів. Кожен контейнер (або колонка) має мінімально допустиму ширину (аналогічно ~50 px). Якщо пересування повзунка занадто сильно звужує один з елементів, рух блокується. У коді перевірка відбувається неявно: колонки не дозволять зменшити свої вкладені елементи менш ніж на мінімум (подібно до перевірки висоти в *CollageTree*), а для базових зображень мінімум задається явно.

3. Зміна розмірів сусідніх областей. Якщо обидва сусідні елементи існують і рух допустимий, їх ширини оновлюються пропорційно. Ліва область (*previousEl*) розширюється на Δx, права (*nextEl*) звужується на ту ж величину (при перетягуванні вправо) або навпаки при русі вліво. Якщо якийсь із сусідніх елементів сам є колонкою (вертикальним контейнером), то потрібно коригувати ширину всіх вкладених у нього зображень. У реалізації: для *CollageColumn* ліва колонка отримує збільшення ширини на Δx і всі її внутрішні зображення теж розширюються на (зсування вліво/вправо на $\Delta x/2$ для центрованого вирівнювання). Для правої колонки – відповідно звуження на Δx для неї і її вмісту. Якщо елементи не є колонками (тобто безпосередньо зображення), то їхні ширини змінюються прямо, без додаткового розподілу. Після цих операцій рядок оновлює свої координати.

4. Синхронізація та відображення. *CollageRow* після зміни викликає метод оновлення своїх дочірніх елементів, щоб перерахувати їхні нові положення. Потім оновлюються координати самого рядка (з врахуванням нових габаритів). Зміни негайно відображаються на екрані шляхом перемальовування полотна (виклик *requestRenderAll*). Позиція повзунка зберігається як $x' = x$ для подальших дій.

Алгоритм *handleMoving* для рядка забезпечує узгоджене масштабування елементів по горизонталі. Таким чином, при зміні ширини одного сегмента рядка інший сегмент автоматично компенсує цю зміну, зберігаючи загальну ширину рядка постійною. Якщо сегментами є колонки, то їх внутрішня структура теж перебудовується аналогічно до вертикального випадку: зміна ширини колонки викликає зміну ширини всіх вкладених зображень пропорційно, щоб не виникло спотворень.

Алгоритм *handleMoving* для *CollageColumn* (вертикальний рівень). Функція *CollageColumn.handleMoving* обробляє переміщення горизонтального повзунка всередині колонки, тобто зміну пропорцій суміжних зображень по висоті. Цей випадок дуже подібний до алгоритму для *CollageTree*, але обмежений межами однієї колонки. Нехай у колонці є два сусідні зображення (або вкладені елементи) над і під повзунком. При зміщенні повзунка на Δy вниз або вгору перевіряється мінімальна висота цих зображень, щоб жодне з них не стало меншим за встановлений мінімум. Далі виконується оновлення висот: верхній елемент отримує додаткову висоту Δy, нижній – втрачає Δy (або навпаки, якщо повзунок рухається в інший бік). Їхні вертикальні позиції зсуваються на $\Delta y/2$ для збереження контактного розташування. Колонка після цього викликає метод оновлення всіх вкладених зображень *updateImageCell*, щоб, наприклад, кожен контейнер зображення всередині знав про свою нову висоту і міг змінити масштаб зображення, якщо потрібно. Після перерахунку параметрів виконується перемальовування полотна (*Canvas*) для відображення результату, а поточна позиція повзунка фіксується як старе значення (*oldY*).

У випадку, коли повзунок у колонці доходить до верхньої або нижньої межі (тобто один з сусідніх елементів відсутній), алгоритм аналогічно оновлює групу елементів зі сторони, де присутні кілька зображень. Наприклад,

якщо повзунок під найвищим зображенням колонки, то при його русі вниз всі нижченаведені зображення колонки зсуваються пропорційно, звільняючи місце. Загалом, *handleMoving* для колонки повторює логіку *handleMoving* для всього колажу, але на локальному рівні: він не впливає на інші частини колажу за межами даної колонки.

Зазначені алгоритми гарантують цілісність колажу під час інтерактивного редагування. Завдяки ієрархічним зв'язкам між елементами, зміна на будь-якому рівні автоматично узгоджується з пов'язаними елементами на інших рівнях. Функція *handleMoving* виступає універсальним алгоритмом для адаптивного масштабування: її реалізація в компонентах ***CollageTree***, ***CollageRow*** та ***CollageColumn*** дозволяє ефективно обробляти зміни розмірів на різних рівнях, забезпечуючи узгодженість між ними та гнучкість інтерфейсу користувача.

Опишемо блок-схему алгоритму *handleMoving* для *CollageTree* (рис. 5–6). На першому кроці визначаємо параметри алгоритму, де y_s – теперішня ордината координат повзунка, y'_s – попередня ордината координат

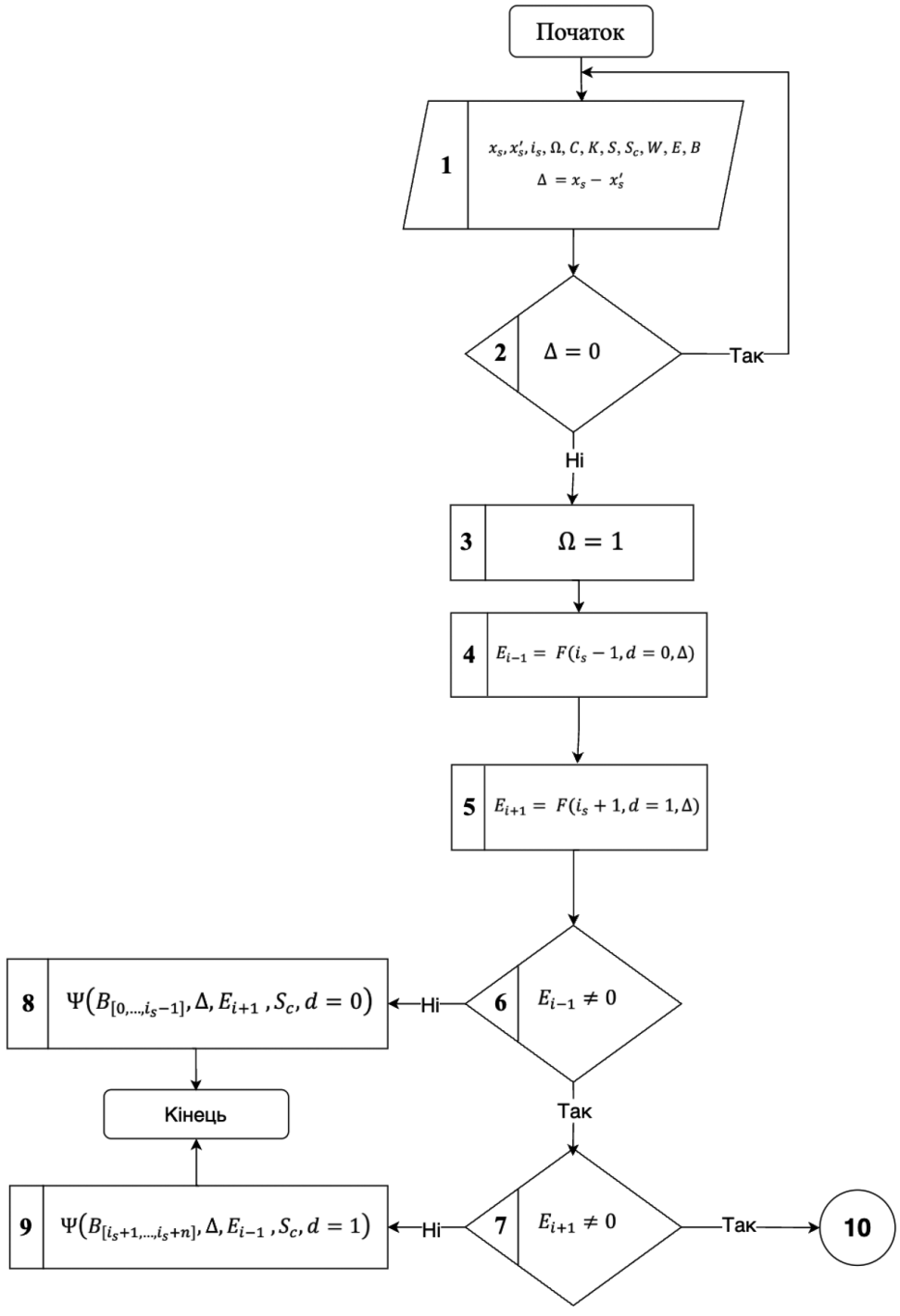


Рис. 5. Блок-схема алгоритму handleMoving для CollageTree

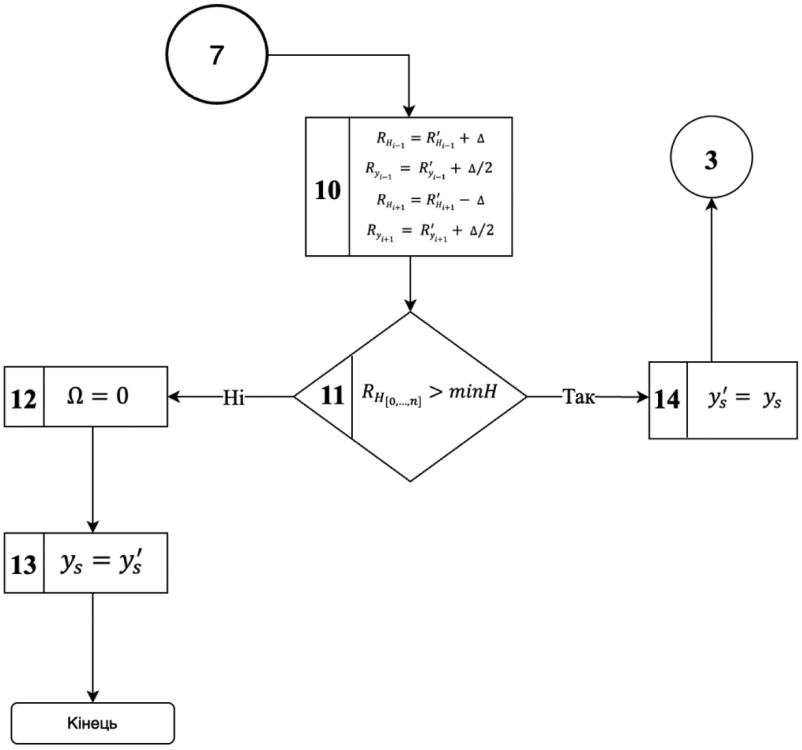


Рис. 6. Блок-схема алгоритму handleMoving для CollageTree (продовження Рис. 5)

повзунка, i_s – індекс рухомого повзунка, Ω – позначення дозволу руху далі (1,0), *C* – *CollageColumn* (колонка), *K* – *ImageContainer* (контейнер зображення), *S* – *CollageSeparator* (повзунок), S_c – рухомий повзунок, *d* – напрям руху *S* (1,0), *r* – елемент рядка, r_s – повзунок рядка, r_C– колонка рядка, r_K – контейнер зображення рядка, $R \in r_s$ чи r_C чи r_K, *H* – висота R_H (висота рядка), $E = R \cup S$. На другому кроці перевіряємо чи змінив рухомий повзунок своє розташування, якщо ні, то повертаємось на початок, якщо так то переходимо на третій крок. На третьому кроці присвоюємо Ω = 1, і дозволяємо рух далі. На четвертому кроці шукаємо *R* перед S_c, який має висоту більшу за min*H*, а на п'ятому кроці шукаємо *R* після S_c, який має висоту більшу за min*H*. На шостому кроці перевіряємо, чи знайшли на четвертому кроці рядок *R* перед S_c з *H* більшою за min*H*. Якщо ні, то переходимо на восьмий крок і виконуємо функцію Ψ. ,ка оновлює ординату координат усіх переданих *E*, для яких ця трансформація можлива, а також збільшує висоту і оновлює ординату координат усіх переданих елементів рядка *R*, який розташований після S_c, та закінчуємо виконання алгоритму *handleMoving*. Якщо на четвертому кроці знайшли *R* перед S_c з *H* більшою за min*H*, то переходимо на сьомий крок і перевіряємо, чи знайшли рядок *R* після S_c з *H* більшою за min*H*, якщо ні, то переходимо на дев'ятий крок і виконуємо функцію Ψ, яка оновлює ординату координат усіх переданих *E*, для яких ця трансформація можлива, а також збільшує висоту і оновлює ординату координат усіх переданих елементів рядка *R*, який розташований перед S_c, та закінчуємо виконання алгоритму *handleMoving*. Якщо на п'ятому кроці знайшли *R* після S_c з *H* більшою за min*H*, то переходимо на десятий крок, на якому оновлюємо R_H та R_y, *R* до та після S_c. Далі переходимо на одинадцятий крок на якому перевіряємо чи містить *CollageTree* ще *R*, у якого $R_H >$ min*H*. Якщо не містить, то переходимо на крок дванадцятий, на якому присвоюємо Ω = 0, і забороняємо рух S_c далі. На тринадцятому кроці присвоюємо y_s значення попередньої ординати координат y'_s, щоб позиція S_c залишалась незмінною і закінчуємо виконання функції. Якщо на одинадцятому кроці ми знаходимо *R*, у якого $R_H >$ min*H*, то переходимо на чотирнадцятий крок. На якому присвоюємо y'_s значення теперішньої ординати координат y_s, і переходимо на третій крок для продовження роботи алгоритму.

Далі опишемо блок-схему алгоритму *handleMoving* для *CollageRow* (рис. 7–8). На другому кроці визначаємо параметри алгоритму, де x_s – теперішня абсциса координат повзунка, x'_s – попередня абсциса координат повзунка, i_s – індекс рухомого повзунка, Ω – позначення дозволу руху далі (1,0), *C* – *CollageColumn* (колонка), *K* – *ImageContainer* (контейнер зображення), *S* – *CollageSeparator* (повзунок), S_c – рухомий повзунок, *d* – напрям руху *S* (1,0), $E = C \cup K$, $B = C \cup K \cup S$, *W* – ширина E_w. На другому кроці перевіряємо чи змінив рухомий повзунок своє розташування, якщо ні, то повертаємось на початок, якщо так то переходимо на третій крок. На третьому кроці присвоюємо Ω = 1, і дозволяємо рух далі. На четвертому кроці шукаємо *E* перед S_c, який має ширину більшу за min*W*. На п'ятому кроці шукаємо *E* після S_c, який має ширину більшу за min*W*. На шостому кроці перевіряємо, чи знайшли на четвертому кроці *E* перед S_c з *W* більшою за min*W*. Якщо ні, то переходимо на восьмий крок

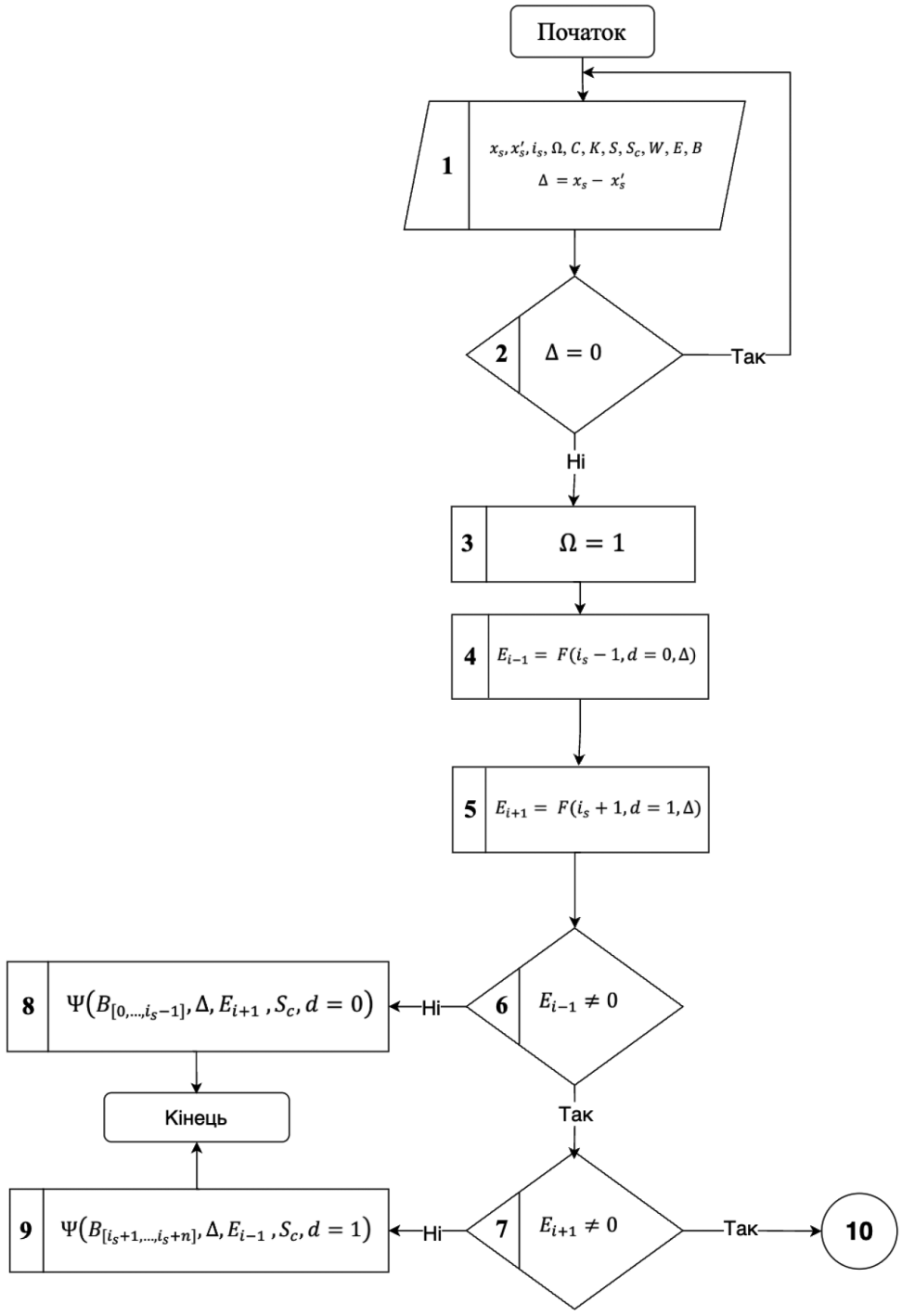


Рис. 7. Блок-схема алгоритму handleMoving для CollageRow

і виконуємо функцію Ψ. ,ка оновлює абсцису координат усіх переданих *B*, для яких ця трансформація можлива, а також збільшує ширину і оновлює абсцису координат усіх переданих елементів *E*, які розташовані після S_c. Якщо на четвертому кроці знайшли *E* перед S_c з *W* більшою за min *W*, то переходимо на сьомий крок. Перевіряємо, чи знайшли *E* після S_c з *W* більшою за min *W*. Якщо ні, то переходимо на дев'ятий крок і виконуємо функцію Ψ, яка оновлює ординати координат усіх переданих *B*, для яких ця трансформація можлива, а також збільшує ширину і оновлює абсцису координат усіх переданих елементів *E*, які розташовані перед S_c. Якщо на п'ятому кроці знайшли *E* після S_c з *W* більшою за min *W*, то переходимо на десятий крок. На ньому оновлюємо E_w та E_y, *E* до та після S_c. Далі переходимо на одинадцятий крок на якому перевіряємо чи містить *CollageRow* ще *E*, у якого $E_w >$ min *W*. Якщо не містить, то переходимо на крок дванадцятий, на якому присвоюємо Ω = 0 і забороняємо рух S_c далі. На тринадцятому кроці присвоюємо x_s значення попередньої абсциси координат x'_s, щоб позиція S_c

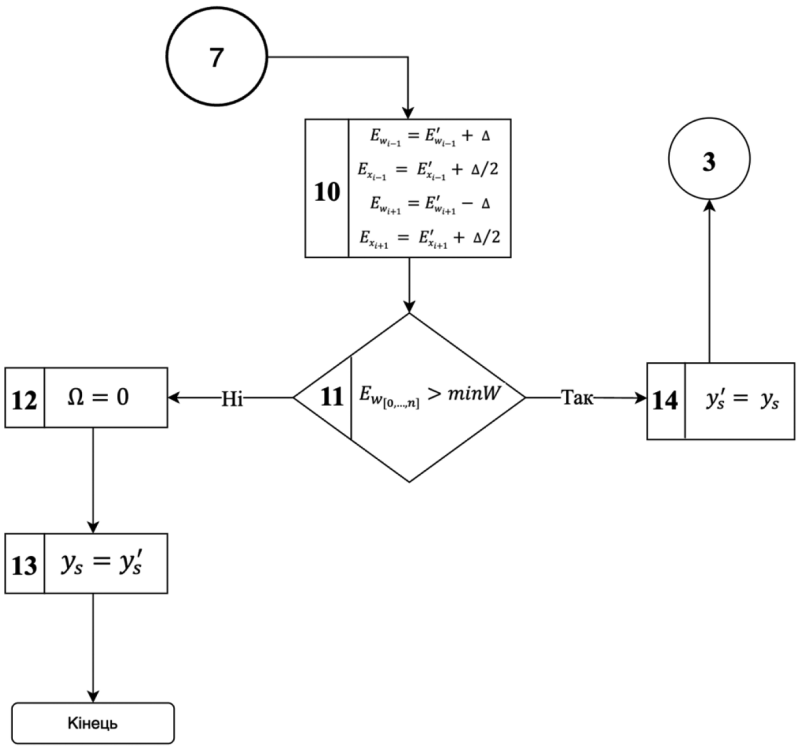


Рис. 8. Блок-схема алгоритму handleMoving для CollageRow (продовження Рис. 7)

залишалась незмінною і закінчуємо виконання функції. Якщо на одинадцятому кроці знаходимо E, у якого $E_w > \min W$, то переходимо на чотирнадцятий крок. На ньому присвоюємо x'_s значення теперішньої абсциси координат x_s, і переходимо на третій крок для продовження роботи алгоритму.

Опишемо блок-схему алгоритму *handleMoving* для *CollageColumn* (рис. 9–10). На першому кроці визначаємо параметри алгоритму, де y_s – теперішня ордината координат повзунка, y'_s – попередня ордината координат повзунка, i_s – індекс рухомого повзунка, Ω – позначення дозволу руху далі (1,0), K – *ImageContainer* (контейнер зображення), S – *CollageSeparator* (повзунок), S_c – рухомий повзунок, d – напрям руху S (1,0), H – висота K_H (висота контейнера зображень), $E = R \cup S$. На другому кроці перевіряємо чи змінив рухомий повзунок своє розташування. Якщо ні, то повертаємось на початок. Якщо так, то переходимо на третій крок. На третьому кроці присвоюємо $\Omega = 1$ і дозволяємо рух далі. На четвертому кроці шукаємо K перед S_c, який має висоту більшу за $\min H$, а на п'ятому кроці шукаємо K після S_c, який має висоту більшу за $\min H$. На шостому кроці перевіряємо, чи знайшли на четвертому кроці рядок R перед S_c з H більшою за $\min H$. Якщо ні, то переходимо на восьмий крок і виконуємо функцію Ψ. ,ка оновлює ординату координат усіх переданих E, для яких ця трансформація можлива, а також збільшує висоту і оновлює ординату координат K, який розташований після S_c, та закінчуємо виконання алгоритму *handleMoving*. Якщо на четвертому кроці знайшли K перед S_c з H більшою за $\min H$, то переходимо на сьомий крок і перевіряємо, чи знайшли K після S_c з H більшою за $\min H$. Якщо ні, то переходимо на дев'ятий крок і виконуємо функцію Ψ, яка оновлює ординату координат усіх переданих E, для яких ця трансформація можлива, а також збільшує висоту і оновлює ординату координат K, який розташований перед S_c, та закінчуємо виконання алгоритму *handleMoving*. Якщо на п'ятому кроці знайшли R після S_c з H більшою за $\min H$, то переходимо на десятий крок. На ньому оновлюємо K_H та K_y, K до та після S_c. Далі переходимо на одинадцятий крок на якому перевіряємо чи містить *CollageColumn* ще K, у якого $K_H > \min H$. Якщо не містить, то переходимо на крок дванадцятий, на якому присвоюємо $\Omega = 0$ і забороняємо рух S_c далі. На тринадцятому кроці присвоюємо y_s значення попередньої ординати координат y'_s, щоб позиція S_c залишалась незмінною і закінчуємо виконання алгоритму. Якщо на одинадцятому кроці знаходимо R, у якого $R_H > \min H$, то переходимо на чотирнадцятий крок, на якому присвоюємо y'_s значення теперішньої ординати координат y_s, і переходимо на третій крок для продовження роботи алгоритму.

Приклад структурованого колажу. Розглянемо більш складний випадок – чотирирівневий колаж, що містить як рядки, так і колонки. На рис. 11 зображено таку структуру: колаж складається з двох рядків на другому рівні. Перший рядок містить чотири контейнери зображень (№ 1, № 2, № 3, № 4) на третьому рівні; другий рядок містить два елементи – колонку з трьома зображеннями (№ 5, № 6, № 7) та окремий контейнер (№ 8). У першому рядку між контейнерами 1–4 розташовані три вертикальні повзунки; у другому рядку між колонкою і контейнером № 8 – один вертикальний повзунок; всередині колонки між зображеннями 5–7 – два горизонтальні

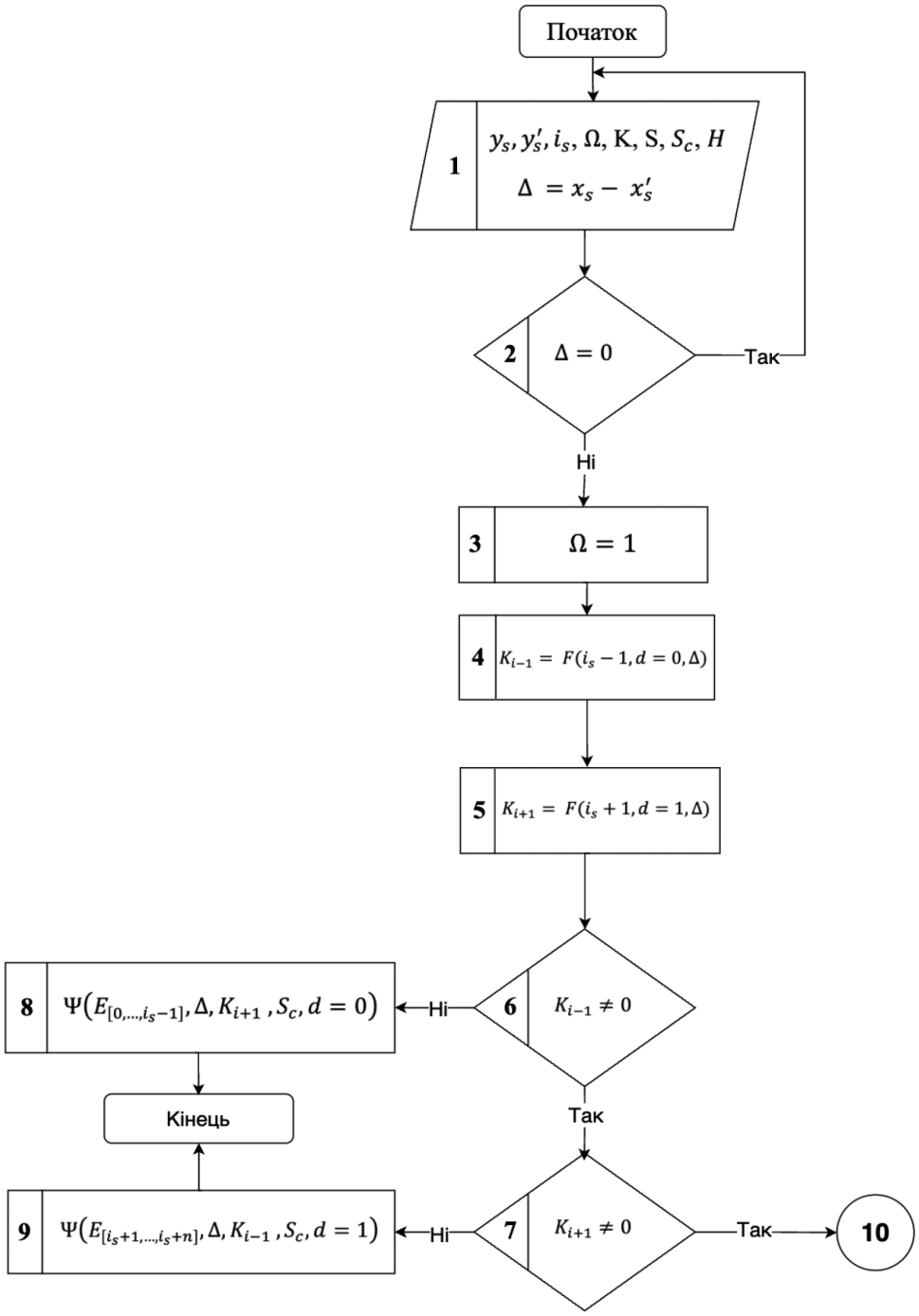


Рис. 9. Блок-схема алгоритму handleMoving для CollageColumn

повзунки; між самим першим і другим рядком – горизонтальний повзунок полотна. Таким чином, дерево колажу має: корінь → 2 рядки; перший рядок → 4 контейнери; другий рядок → 1 колонка + 1 контейнер; колонка (в другому рядку) → 3 контейнери. Всього 8 зображень. Колонка в складі другого рядка дозволяє згрупувати зображення № 5–7 вертикально. У такому колажі також діють всі описані алгоритми. Якщо, наприклад, пересунути вертикальний повзунок між контейнерами № 3 та № 4 у першому рядку вліво, контейнер № 4 почне збільшуватися, а № 3 – зменшуватися. Коли № 3 досягне мінімальної ширини, подальший рух спричинить зменшення контейнера № 2 (другого зліва), рис. 11, *b*. В результаті кілька елементів змінять розміри одночасно, перерозподіливши вивільнений простір. Аналогічно, при збільшенні висоти контейнера № 5 (верхнього в колонці) за рахунок зменшення № 6 і № 7, якщо останні досягнуть мінімуму – рух повзунка зупиниться рис. 11, *c*. Таким чином, деревовидна модель забезпечує узгодженість на всіх рівнях: навіть складні багаторівневі структури автоматично підтримують логічні пропорції між всіма частинами композиції.

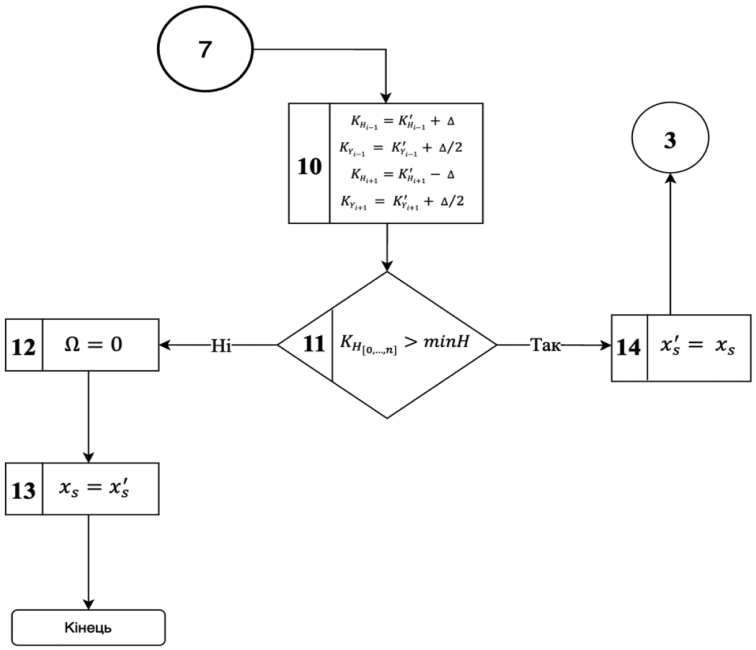


Рис. 10. Блок-схема алгоритму handleMoving для CollageColumn (продовження рис. 9)

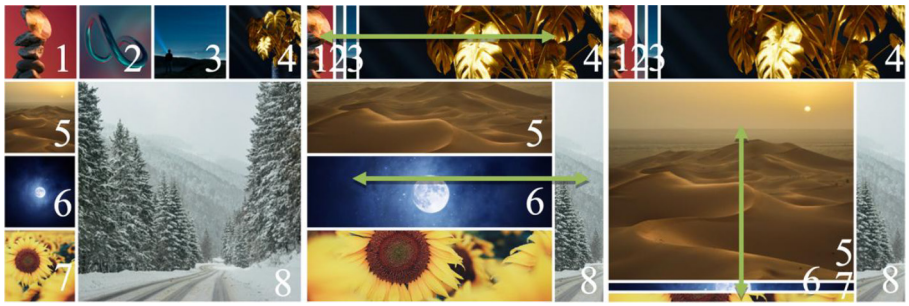


Рис. 11. Ілюстрація чотирьохрівневого колажу в початковому вигляді *a*, руху повзунка між елементами рядка *b* та горизонтального повзунка між елементами колонки *c*

Технологічна реалізація. Для впровадження розробленої моделі було обрано веб-фреймворк Angular [2] для побудови інтерфейсу користувача та бібліотеку Fabric.js [5], для роботи з HTML5 Canvas [4]. Canvas-технологія забезпечує відмалювання зображень і контейнерів, а Fabric.js спрощує маніпуляції з об'єктами на полотні (масштабування, перетягування тощо). Використання Angular дозволило побудувати компонентну архітектуру: кожен елемент колажу (рядок, колонка, контейнер) став окремим компонентом із власною логікою.

Зв'язки між компонентами реалізовані через алгоритми властностей та подій Angular: наприклад, подія «зміна ширини секції» відправляється батьківському компоненту рядка, який у відповідь змінює властивості сусідніх секцій. Така модель полегшує підтримку рекурсивних залежностей. Крім того, використано технології WebGL [7] для апаратного прискорення рендерингу (через Fabric.js), що дозволяє плавно перетягувати повзунки навіть у великих колажах. Діаграму класів інформаційної системи наведено на рис. 12.

Після реалізації, модель інтегрована у веб-додаток та протестована на різних сценаріях редагування. Зокрема, перевірено: додавання/видалення секцій, зміна розмірів контейнерів у різних частинах колажу, екстремальні співвідношення (коли один елемент займає майже весь простір, а інші мінімальні), тощо. В усіх випадках система підтримувала узгодженість – жодних накладень чи виходів за межі полотна не відбувалося, всі пов'язані елементи коректно реагували на зміни.

Порівняльний аналіз з традиційними моделями. Для кількісної оцінки ефективності було змодельовано типову операцію редагування: збільшення одного з контейнерів у колажі та приведення решти елементів до узгодженого вигляду. В умовах Canva або Pixlr Editor ця операція вимагала, як уже зазначалося, до 10 послідовних ручних дій. У нашій деревовидній моделі той самий результат досягається двома діями: пересуванням відповідного вертикального повзунка, а потім (якщо зміна висоти теж необхідна) горизонтального повзунка. Наприклад,

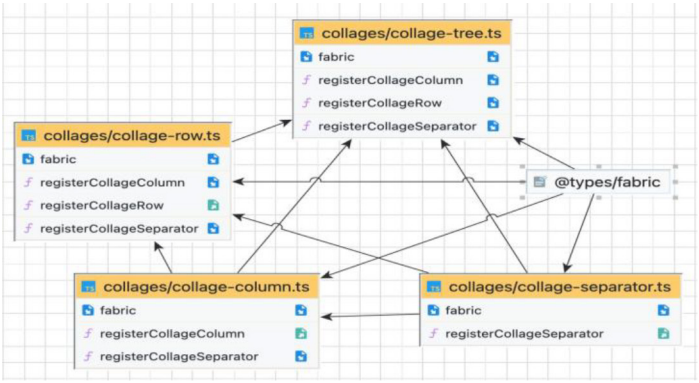


Рис. 12. Діаграма класів інформаційної системи

для колажу з Pixlr Editor потрібно було окремо змінити ширини кількох контейнерів і їх розташування, щоб усунути накладання. Натомість у деревовидній моделі достатньо перетягнути один повзунок ширини і один повзунок висоти – система сама перерахує всі пов'язані параметри. У результаті отримуємо, що виконання 2-ох дій у розробленій моделі, потребує виконання 10-ти дій, у моделях відомих систем, тим самим зменшено кількість дій у 5 разів. Це суттєво економить час і зусилля користувача. Крім того, автоматизація усуває можливі помилки, пов'язані з ручним налаштуванням (наприклад, неточне вирівнювання). Результати тестування підтвердили, що деревовидна модель колажів забезпечує високу інтерактивність та адаптивність. Користувач може в реальному часі бачити, як зміни одного елементу впливають на всю композицію: перетягування повзунка відразу перерозподіляє простір між зображеннями, зберігаючи загальний баланс. Це робить процес редагування інтуїтивно зрозумілішим і швидшим, оскільки відпадає потреба вручну контролювати кожен фрагмент – система сама підтримує логічні зв'язки і пропорції. Звісно, розроблені моделі алгоритмів не вирішують всіх можливих задач автоматичної композиції (наприклад, вона не підказує, які саме зображення обрати або як переставити їх місцями для кращої композиції – ці аспекти належать до сфери інтелектуальних алгоритмів компонування). Проте вони ефективно вирішують поставлену проблему узгодженого редагування вже існуючого макету. У поєднанні з алгоритмами автоматичної генерації початкового розташування (де можуть використовуватися згадані ШІ-моделі), деревовидна модель може стати потужною основою для сучасних інформаційних систем.

Висновки

У роботі створено та досліджено модель опрацювання колажів, яка забезпечує:

Автоматичну адаптацію елементів колажу. Зміни в одній частині композиції автоматично і пропорційно впливають на всі пов'язані елементи, зберігаючи загальну цілісність. Це усуває проблему розсинхронізації елементів, характерну для традиційних моделей колажів без зв'язків.

Підвищення швидкості та зручності редагування. Кількість дій користувача зменшується у кілька разів (приблизно в 5 разів для розглянутого сценарію) завдяки тому, що система сама виконує рутинні коригування сусідніх елементів. Редагування складних колажів стає менш трудомістким і більш інтуїтивним.

Масштабованість на складні композиції. Модель підтримує багаторівневі структури (рядки всередині рядків у вигляді колонок), що дає змогу створювати колажі довільної складності та розміру. В кожному випадку зберігається працездатність алгоритмів перерозподілу розмірів.

Програмна реалізація і апробація моделей алгоритмів колажів підтвердила їх ефективність та правильність функціонування. Створені алгоритми пропорційного перерозподілу коректно опрацьовують граничні випадки (мінімальні розміри), забезпечуючи відсутність накладань та виходів за межі полотна. Порівняння з традиційними моделями (реалізованими в інформаційних системах Canva, Pixlr) продемонструвало очевидні переваги у швидкості редагування та підтримці цілісності композиції. Напрямки подальших досліджень можуть включати інтеграцію елементів штучного інтелекту для автоматичної генерації початкового макету колажу на основі змістового аналізу зображень (наприклад, групування тематично схожих зображень, як у методі кореляційного колажу. Це дозволило б поєднати переваги автоматичного компонування з гнучкістю створеної моделі редагування. Також перспективним є розширення моделі на випадки нестандартних форм області колажу (не прямокутна канва) та адаптація під мобільні пристрої з торкальним інтерфейсом, де користувач міг би жестами змінювати структуру колажу. Розроблена деревовидна модель може бути ефективно впроваджена в сучасні онлайн-платформи редагування зображень, підвищуючи їх продуктивність, зручність користування та загальну функціональність у задачах створення складних графічних колажів. Розроблена модель може бути використана в інформаційних системах орієнтованих на UI/UX дизайнерів, фотографів, рекламних агенцій тощо.

Список використаної літератури

1. Adobe Photoshop. (n.d.). Photoshop.adobe.com. URL: https://photoshop.adobe.com/discover
2. Angular. (2025). Angular.dev. URL: https://angular.dev/api
3. Canva. (2025). Canva. URL: https://www.canva.com/
4. Canvas API. (2019, December 2). MDN Web Docs. URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Canvas_API
5. JSDoc: Home. (n.d.). Fabricjs.com. URL: http://fabricjs.com/docs/
6. Liu, L., Zhang, H., Jing, G., Guo, Y., Chen, Z., & Wang, W. (2017). Correlation-Preserving Photo Collage. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 24(6), pp. 1956–1968. DOI: 10.1109/TVCG.2017.2703853
7. Mozilla. (2019, March 4). WebGL: 2D and 3D graphics for the web. MDN Web Docs. URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebGL_API
8. Online Photo Editor | Pixlr Editor. (2019). Pixlr.com. URL: https://pixlr.com/editor/
9. Rother, C., Bordeaux, L., Hamadi, Y., & Blake, A. (2006). AutoCollage. *ACM Transactions on Graphics*, vol. 25(3), pp. 847–852. DOI: 10.1145/1141911.1141965
10. Yu, J., Chen, L., Zhang, M., & Li, M. (2022). SoftCollage: A Differentiable Probabilistic Tree Generator for Image Collage. *2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (CVPR), pp. 3719–3728. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.00371
11. Zhang, M., Li, M., Chen, L., & Yu, J. (2021). Aesthetic Photo Collage with Deep Reinforcement Learning. *ArXiv (Cornell University)*. DOI: 10.48550/arXiv.2110.09775
12. Fernández, D. P., Postels, J., & Tombari, F. (2021). Variational Transformer Networks for Layout Generation. *Conference: 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. DOI: 10.1109/cvpr46437.2021.01343
13. Chen, L., Jing, Q., Tsang, Y., & Zhou, T. (2024). Iris: a multi-constraint graphic layout generation system. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, vol. 25(7), pp. 968–987. DOI: 10.1631/fitee.2300312
14. Huo, H., & Wang, F. (2022). A Study of Artificial Intelligence-Based Poster Layout Design in Visual Communication. *Scientific Programming*, vol. 2022, pp. 1–9. https://doi.org/10.1155/2022/1191073
15. Cao, Y., Ma, Y., Zhou, M., Liu, C., Xie, H., Ge, T., & Jiang, Y. (2022). Geometry Aligned Variational Transformer for Image-conditioned Layout Generation. *Proceedings of the 30th ACM International Conference on Multimedia*, vol. 1, pp. 1561–1571. DOI: 10.1145/3503161.3548332
16. Lu, Y., Tong, Z., Zhao, Q., Oh, Y., Wang, B., & Li, T. J.-J. (2024). Flowy: Supporting UX Design Decisions Through AI-Driven Pattern Annotation in Multi-Screen User Flows. ArXiv (Cornell University). DOI: 10.48550/arxiv.2406.16177
17. Shabani, M. A., Wang, Z., Liu, D., Zhao, N., Yang, J., & Furukawa, Y. (2024). Visual Layout Composer: Image-Vector Dual Diffusion Model for Design Layout Generation. *2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 9222–9231. DOI: 10.1109/cvpr52733.2024.00881
18. Shi, Y., Shang, M., & Qi, Z. (2023). Intelligent layout generation based on deep generative models: A comprehensive survey. *Information Fusion*, vol. 100, pp. 101940–101940. DOI: 10.1016/j.inffus.2023.101940
19. Hadi AlZayer, Lin, H., & Bala, K. (2021). AutoPhoto: Aesthetic Photo Capture using Reinforcement Learning. *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 944–951. DOI: 10.1109/iros51168.2021.9636788
20. Zhou, M., Xu, C., Ma, Y., Ge, T., Jiang, Y., & Xu, W. (2022). Composition-aware Graphic Layout GAN for Visual-Textual Presentation Designs. *Proceedings of the 31 International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 4995–5001. DOI: 10.24963/ijcai.2022/692
21. Zhou, Y., Jing, Q., Li, Z., Shi, L., Chen, L., & Sun, L. (2023). Element-Conditioned Gan for Graphic Layout Generation. *Neurocomputing*, vol. 591, pp. 127730. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.127730

УДК 004.412 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.26

Л. М. МАКАРОВА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
ORCID: 0000-0003-2903-3001

М. А. ТАТАРЕНКО
аспірант кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
ORCID: 0009-0009-3330-0169

АНАЛІЗ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ МЕТРИК ЧИДАМБЕРА І КЕМЕРЕРА З ПРОГРАМНИХ ПРОЕКТІВ, РОЗРОБЛЕНИХ МОВОЮ JAVA

Метрики Чидамбера та Кемерера (CK Metrics) – широко поширений набір метрик, призначений для вимірювання властивостей в об'єктно-орієнтованих програмних системах. Набір CK Metrics включає шість показників, кожен з яких дає уявлення про різні аспекти розробки та реалізації програмного забезпечення. Об'єктно-орієнтована мова програмування Java і досі залишається однією з основних для створення як серверних програмних систем, так і нативних мобільних застосунків для ОС Android та десктопних програми для стаціонарних ПК.

У даній роботі надається аналіз інструментів, які можна використовувати для отримання числових значень метрик з набору CK Metrics з програмних проектів, написаних із застосуванням мови програмування Java. Надано опис та коротку оцінку зручності використання наступних інструментів: ck, ckjm, ckjm-extended, CodeMR, Metrics Reloaded, Metrics Tree.

В основному представлені інструменти, які розповсюджуються безкоштовно, за виключенням CodeMR, який має обмежену безкоштовну та платну повнофункціональну версії. Представлені в аналізі інструменти можна поділити на дві групи с точки зору взаємодії з користувачем: через інтерфейс командного рядка і як плагіни для інтегрованого середовища розробки IntelliJ, яке де-факто можна назвати стандартом для розробки програмних систем, реалізованих мовою Java. Інструменти для взаємодії через графічний інтерфейс користувача в даному аналізі не представлені.

Результати аналізу допоможуть зробити правильний вибір інструментального засобу для отримання числових значень метрик з набору CK Metrics, виходячи з конкретних вимог розробника чи дослідника та досягти потрібного результату з меншою витратою часу на самостійне вивчення можливостей відповідного інструментального засобу.

Ключові слова: *метрики Чидамбера та Кемерера, об'єктно-орієнтовані метрики, метрики програмного забезпечення, вимірювання метрик програмного забезпечення, Java, Android, IntelliJ.*

L. M. MAKAROVA
PhD, Associate Professor at the Department of Automated Systems Software
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
ORCID: 0000-0003-2903-3001

M. A. TATARENKO
Postgraduate Student at the Department of Automated Systems Software
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
ORCID: 0009-0009-3330-0169

ANALYSIS OF TOOLS FOR OBTAINING CHIDAMBER AND KEMMERER METRICS FROM SOFTWARE PROJECTS DEVELOPED IN JAVA

Chidamber and Kemerer Metrics (CK Metrics) is a widely used set of metrics designed to measure properties in object-oriented software. The CK Metrics set includes six indicators, each of which provides representation into different aspects of software development and implementation. The object-oriented Java programming language still remains one of the main ones for creating both server-side software and native mobile applications for Android OS and desktop applications for stationary PCs.

This paper provides an analysis of tools that can be used to obtain numerical values of metrics from the CK Metrics set from software projects written using the Java programming language. A description and a brief assessment of the usability of the following tools are provided: ck, ckjm, ckjm-extended, CodeMR,, Metrics Reloaded, Metrics Tree.

The tools are mainly presented, which are distributed open source, with the exception of CodeMR, which has a limited free and paid full-featured version. The tools presented in the analysis can be divided into two groups in terms of user interaction: via the command line interface and as plugins for the IntelliJ integrated development environment, which can be de facto called the standard for developing software implemented in Java. Tools for interaction via the graphical user interface are not presented in this analysis.

The results of the analysis will help to make the right choice of a tool for obtaining numerical values of metrics from the CK Metrics set, based on the specific requirements of the developer or researcher and achieve the desired result with less time spent on independently studying the capabilities of the corresponding tool.

Key words: *CK Metrics, object-oriented metrics, software metrics, measuring software metrics, Java, Android, IntelliJ.*

Постановка проблеми

Отримання метрик програмного забезпечення (ПЗ) – дуже важливий і складний процес. Широко визнано, що визначення розміру чи прогнозування трудовитрат процесу розробки ПЗ – один із найбільш домінуючих аспектів оцінки витрат на його розробку. Вимірювання метрик ПЗ має важливе значення для досягнення основних цілей управління процесом розробки ПЗ: прогнозування, прогресу та покращення якості розробки.

Метрики ПЗ – це кількісні показники, які дозволяють виміряти різні властивості та характеристики ПЗ [1, 2]. Правильно обрані метрики можуть допомогти керівництву, інженерам, розробникам зосередитись на своїх цілях.

Обґрунтований вибір інструменту для отримання числових значень метрик з набору CK Metrics, може бути зроблений виходячи з конкретних вимог розробника чи дослідника.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [3] пропонується дослідження та розробка нового інструменту для розрахунку числових значень метрик для програм, розроблених мовою програмування Java. Інструмент реалізує розрахунок метрик з набору CK Metrics, метрик Абдіна (Abdeen), Дюкасса (Ducasse) та Сахрауї (Sahraoui), а також метрик модульності. Наголошується, що розроблюваний інструмент також повинен дозволяти користувачеві легко розширювати його шляхом додавання нових метрик. Запропонований інструмент в [3] заснований на бібліотеці аналізу байт-коду BCEL, яка призначена для того, щоб надати зручний спосіб аналізу, створення та маніпулювання бінарними файлами класів Java (тими, що мають розширення.class).

В роботі [4] надається короткий аналіз інструментальних засобів для отримання числових значень метрик, в основному розміру вихідного коду. Це такі інструменти, як: Analyst4j, Loc Metric, Code Counter, Source Monitor, Code Analyzer, Ecilpse Metric Plugin. В роботі можна побачити, що Analyst4j дозволяє отримувати числові значення деяких метрик з набору CK metrics. Треба відзначити, що посилання на офіційні сторінки багатьох з цих інструментів не працюють, а деякі з них, як, наприклад, Analyst4j взагалі неможливо знайти за допомогою пошукової системи.

В роботі [5] запропоноване порівняльне дослідження, що має на меті дати уявлення про особливості та можливості різних інструментів для отримання числових значень об'єктно-орієнтованих метрик. Мета роботи полягає в тому, щоб допомогти у виборі найбільш підходящого інструменту. Представлений аналіз близько двадцяти інструментів. Розглядаються як комерційні рішення, так і програми з відкритим вихідним кодом. Порівняння відображене в таблицях за різними критеріями, наприклад: підтримка мов програмування, різних метрик, ліцензування, варіанти підтримки вхідних та вихідних даних.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження – проаналізувати та систематизувати інструментальні засоби для отримання числових значень метрик ПЗ, в першу чергу з набору метрик Чидамбера та Кемерера (Chidamber & Kemerer, набір CK metrics) з програмних проектів, розроблених із застосуванням мови програмування Java.

Представлений аналіз таких інструментів, як: ck, ckjm, ckjm-extended, CodeMR, Metrics Reloaded, Metrics Tree.

Дослідження може бути корисним для розширення можливостей вибору інструментарію для тих дослідників та розробників, яким потрібно виконувати вимірювання шляхом отримання числових значень з вихідного коду, написаного мовою програмування Java.

Викладення основного матеріалу дослідження

Метрика ПЗ є мірою певної властивості, характеристики або ефективності програмного коду. Основна мета розрахунку метрик ПЗ полягає в отриманні відтворюваних та підданих кількісній оцінці вимірювань, які можна використовувати для прогнозування дефектів ПЗ, оптимізації продуктивності, планування графіка робіт, забезпечення якості, оцінки витрат, оцінки розміру нового проекту, що розробляється на основі даних отриманих з минулих схожих проектів, наприклад на основі регресійного аналізу.

Об'єктно-орієнтована (ОО) парадигма є однією з найпопулярніших у сучасній розробці програмних систем. ОО метрики застосовуються для вимірювання властивостей об'єктно-орієнтованого ПЗ. Багато з них були

розроблені для парадигм ОО підходу (абстракція, клас, об'єкт, успадкування тощо), для обчислення різних атрибутів, таких як якість, зв'язність і т.д. ОО методології вимагають значних зусиль на ранніх етапах життєвого циклу програмного проекту для ідентифікації об'єктів та класів, атрибутів та операцій, відносин між об'єктами та класами, інкапсуляції, наслідування та поліморфізму. Все це вимагає від дизайнерів ПЗ ретельного структурування проекту та розгляду взаємодії між об'єктами.

Якість ОО проектування визначають за допомогою різних метрик. Одні з базових та найпоширеніших – метрики Чидамбера та Кемерера [6–9], які пропонують 6 метрик, що розраховуються для кожного класу в проекті. Часто в різних публікаціях можна зустріти скорочення CK, що і означає, що йдеться про набір метрик Чидамбера та Кемерера. Це такі метрики, як: WMC (Weighted Methods per Class) – зважені методи на клас, DIT (Depth of Inheritance Tree) – глибина дерева успадкування, NOC (Number Of Children) – кількість підкласів даного класу, CBO (Coupling Between Object classes) – зв'язаність між класами об'єктів, RFC (Response For a Class) – відповідь для класу, LCOM (Lack of Cohesion in Methods) – відсутність зв'язності методів.

Мова програмування Java – одна з популярних мов для створення серверного ПЗ рівня підприємства (Java Enterprise Edition), десктопних програми для стаціонарних ПК і для написання нативних мобільних застосунків для ОС Android [10]. Навіть незважаючи на те, що ще однією мовою є відносно молода для екосистеми Android мова програмування Kotlin, Java і досі залишається популярною, особливо для підтримки вже існуючих нативних мобільних Android застосунків.

Далі розглянуті інструменти, які дозволяють отримувати числові значення метрик з набору CK Metrics з програм, розроблених мовою програмування Java. Слід зазначити, що деякі інструменти дозволяють розраховувати лише частину набору CK-метрик. Оскільки середовище розробки IntelliJ IDEA для мови програмування Java та розробки нативних мобільних застосунків є де-факто стандартом, то наводяться також плагіни для цього середовища, які дозволяють отримати CK метрики.

CK від розробника Маурісіо Аніче (Maurício Aniche) – популярний інструмент для отримання багатьох різних метрик із вихідного коду Java програм [11]. Цей інструмент у певному сенсі можна назвати еталонним, через те, що він часто використовується науковцями у своїх роботах. Це проект з відкритим вихідним кодом (Open source). Взаємодія з програмою відбувається через інтерфейс командного рядка (Command Line Interface, CLI). Цей інструмент зберігає результати аналізу тільки в файл в CSV форматі. Тому результати аналізу потрібно обробляти вручну за допомогою табличного процесора (MS Excel, LibreOffice Calc), або спеціалізованих програм. CK можна використовувати як автономну програму так і у вигляді бібліотеки для підключення у власний проект. CK охоплює всі аспекти об'єктно-орієнтованого програмування. І головне, що він дозволяє розраховувати всі ООП метрики набору CK Metrics.

ckjm. Скорочення від Chidamber та Kemerer Java Metrics. Автор цього інструменту Діомідіс Спінелліс (Diomidis Spinellis) створив консольну програму для обчислення всіх метрик Чидамбера та Кемерера з Java програм [12]. Крім того, Спінелліс включив до свого інструменту дві додаткові метрики, які не є частиною набору CK: CA (аферентні зв'язки) та NPM (кількість загальнодоступних методів). ckjm визначає значення метрик для кожного класу окремо. Анонімні класи обробляються як автономні об'єкти.

Інструмент є автономною консольною програмою написаною на Java. Тому для її запуску потрібен Java компілятор. ckjm – це також Open source проект з відкритим вихідним кодом, який знаходиться у GIT репозиторії автора. Результати обчислень відображаються безпосередньо у стандартному виводі. ckjm можна використовувати як завдання ant, а також безпосередньо генерувати вихідні дані у форматі XML. Це дозволяє виконати постобробку виводу XML за допомогою XSLT для створення гарно оформлених звітів.

Важливою особливістю цієї програми, є те що в якості вхідних даних потрібно подавати файли байт-коду (.class) у форматі JVM. Це створює проблему для Android проектів, де вихідними файлами є формат Dalvik (байт-код Dex). Однак класи Java зазвичай спочатку компілюються у формат JVM, а потім перетворюються в байт-код Dex. Отже, можна використовувати проміжні файли байт-коду JVM. Крім того, вхідні файли для ckjm мають бути правильно представлені у командному рядку. Це може включати додаткову роботу з вбудованими UNIX інструментами, такими як find, sed, а також безпосередньо з компілятором java. Це описано на сторінці документації.

Як пише автор інструменту ckjm на сторінці цього проекту, що він написав ckjm через розчарування відсутності надійних програм для розрахунку об'єктно-орієнтованих метрик Чидамбера та Кемерера. Програми, які він знаходив, розраховували лише деякі CK метрики, або давали невірні результати, або були вкрай неефективними – вимагали величезних ресурсів ПК. Тому створений ним проект Ckjm – простий та аскетичний інструмент, який слідує традиції UNIX – добре робити щось одне. Він не переглядає рекурсивно всі каталоги в пошуках файлів, які потрібно виміряти, не пропонує графічного інтерфейсу користувача, однак виконує свою роботу ретельно та ефективно, пропонуючи також і високу продуктивність.

З цього опису можна зрозуміти простоту ckjm. Проте перед його застосуванням обов'язково потрібно ознайомитись із документацією, представленою на сторінці автора ckjm.

ckjm-extended. Інструмент ckjm отримав подальший розвиток під назвою ckjm-extended [13]. Автор ckjm-extended, Маріан Юреско (Marian Jureczko) зазначає, що цей інструмент можна вважати наступною версією ckjm. Розвиток полягає в тому, що ckjm-extended обчислює додаткові метрики [14]. В іншому відмінностей майже немає. В якості вхідних даних також потрібно подавати скомпіловані файли байт-коду (.class) у форматі JVM. Результати роботи програми відображаються у стандартний вихідний потік (в консоль), або з можливістю експорту у формат XML.

Даний інструмент це також Open source проект з відкритим вихідним кодом, який доступний у GIT репозиторії автора [15], а також на його сайті [13].

Далі перераховані додаткові метрики, які розраховує ckjm-extended [14]: ефферентні зв'язки (Efferent coupling, Ce), кількість публічних методів для класу (Number of Public Methods for a class, NPM), відсутність зв'язності методів (Lack of COhesion in Methods, LCOM3), кількість рядків вихідного коду (Lines Of Code, LOC), доступ до даних (Data Access Metric, DAM), міра агрегації (Measure Of Aggregation, MOA), міра функціональної абстракції (Measure of Functional Abstraction, MFA), згуртованість між методами класу (Cohesion Among Methods of class, CAM), зв'язаність успадкування (Inheritance Coupling, IC), зв'язаність між методами (Coupling Between Methods, CBM), середня складність методу (Average Method Complexity, AMC), цикломатична складність Маккейба (McCabe's Cyclomatic Complexity, CC).

CodeMR – плагін для IDE (Integrated Development Environment) IntelliJ і Eclipse, що дозволяє розраховувати різні метрики для програм, написаних мовами програмування Java, Kotlin, Scala [16]. CodeMR є платним плагіном. Вартість річної ліцензії на травень 2025 року для індивідуальних користувачів становить 149 доларів США. Доступна версія для ознайомлення з повним функціоналом. Період ознайомлення складає 7 днів.

CodeMR сумісний з IDE Eclipse [17], а також з багатьма продуктами IntelliJ Platform Community та Ultimate Edition [16]. На сторінці завантаження доступні різні версії плагіна, які сумісні з різними версіями платформи IntelliJ, починаючи з IntelliJ 2017 і вище.

Плагін доступний на офіційному сайті [18], а також у магазині плагінів Jetbrains Marketplace для IDE IntelliJ [16]. Цей інструмент дозволяє розраховувати велику кількість різноманітних метрик. Важливо, що цей плагін дозволяє розраховувати всі метрики набору CK Metrics. Плагін підтримує набори метрик на рівні проекту, пакета, класу та методу.

Далі наведено рівні та деякі метрики, які дозволяє розраховувати CodeMR.

Для всіх рівнів (всього проекту, пакета, класу, методу): кількість рядків коду (LOC), набір метрик Холстеда, зручність обслуговування (maintainability).

Рівень проекту: загальна кількість рядків коду проекту, кількість пакетів, зовнішніх пакетів, зовнішніх сутностей.

Рівень пакету: загальна кількість рядків коду пакета, еферентний та аферентний зв'язок, кількість інтерфейсів, класів, сутностей, абстрактність, нестабільність.

Рівень класу: кількість рядків коду, зважені методи на клас (WMC), глибина дерева успадкування (DIT), кількість дочірніх класів (NOC), зв'язаність між класами об'єктів (CBO), відповідь для класу (RFC), відсутність зв'язності методів (LCOM), зв'язок між методами, кількість полів, методів, статичних полів, статичних методів, перевизначених методів, доступ до зовнішніх даних, відсутність тісної зв'язності класів.

Рівень методу: кількість рядків коду, цикломатична складність Маккейба, глибина вкладених блоків, кількість параметрів, викликаних методів, доступних полів.

Як можна бачити, розрахунок набору CK-метрик підтримується в повному обсязі.

У вікні структурованого деревоподібного вигляду (Project Outline) показаного на рис. 1, відображаються числові значення метрик елементів (класів, інтерфейсів, і т.д.) програмного проекту відкритого у IDE IntelliJ IDEA. Їх можна сортувати за стовпцями різних метрик, швидко переглядати найпроблемніші елементи та переходити до вихідного коду вибраного елемента.

CodeMR представляє результати розрахунку метрик не тільки у вигляді числових значень, а й у вигляді різних варіантів візуалізацій. Далі наведено описи деяких варіантів візуалізацій.

– Структура пакета (Package Structure) у вигляді бульбашкової діаграми дозволяє розглянути повністю весь проект.

– Розподіл метрик (Metric Distribution) показує розподіл рівнів метрик у вигляді кругових діаграм. Метрики розподіляються за 5-ма рівнями: низький, низький-середній, середній-високий, високий, дуже-високий. На кругових діаграмах вони забарвлені різними кольорами. Зрізи кругових діаграм пропорційні до розміру коду класів відповідного рівня.

– Залежності пакетів (Package Dependency) дозволяє відповідно переглянути залежності між різними пакетами.

– Статистика проекту (Project Outline) надає можливість побачити всі метрики пакета, класу, методу та їх рівні якості у вигляді зведеної таблиці. Також можна вибрати лише потрібні метрики та переглядати інформацію щодо них.

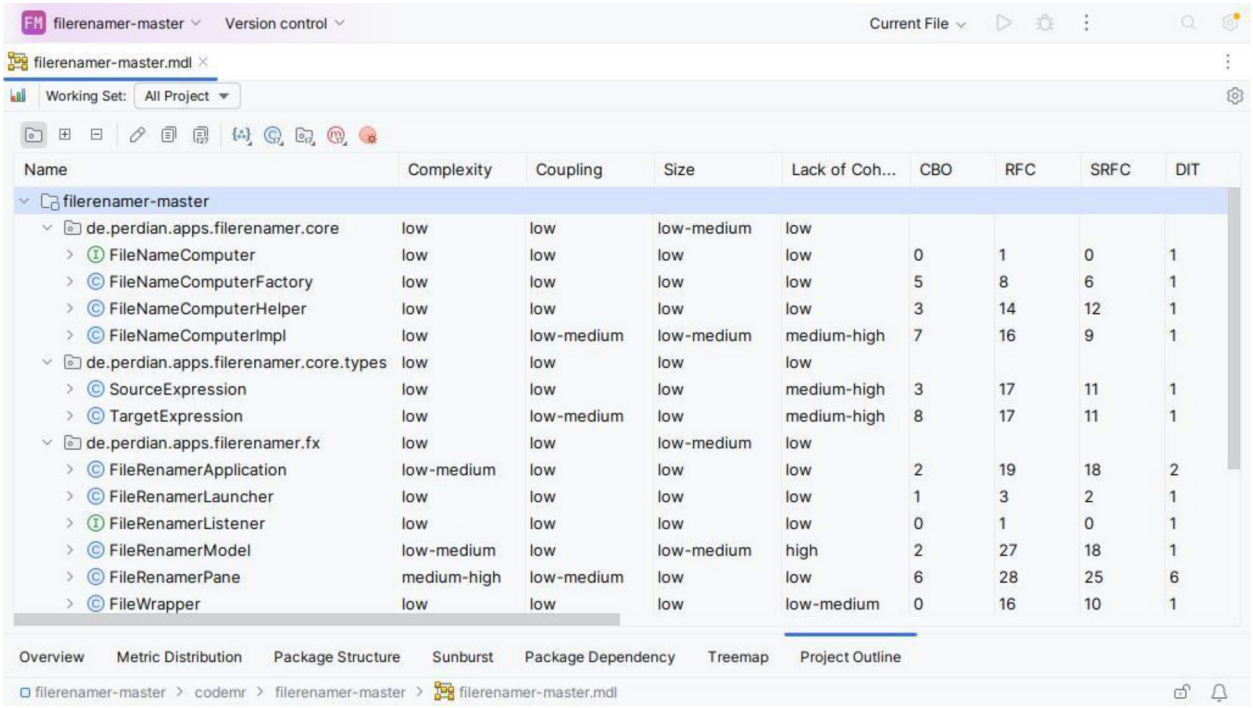


Рис. 1. Вікно структурованого деревоподібного вигляду програмного проекту відкритого в IDE IntelliJ IDEA

– Візуалізація у вигляді графів (Graph Editor) спрощує розуміння та рефакторинг аналізуємої програмної системи.

Цікавою особливістю плагіна є відображення атрибутів якості таких як складність (complexity), зчеплення (coupling), перевикористання коду (reusability), читабельність (readability), зручності обслуговування (maintainability) у вигляді графа. Візуальними властивостями вузла графа є його колір, форма та розмір. Колір свідчить про складність сутності. Змінюється у колірній шкалі від синього до червоного. Чим вище складність – тим більше зміщення у бік червоного кольору. Коли значення атрибуту зв'язку класу збільшується, форма вузла графа змінюється на значок із великою кількістю кутів. Наприклад, трикутник, квадрат, п'яти кінцева зірка і т.д.. Клас з високим ступенем зв'язку має більше кутів, що вказують на більшу кількість точок взаємодії з іншими класами. Розмір вузла графа є розміром класу. Чим більший розмір класу, тим більше розмір вузла графа.

Даний плагін дозволяє генерувати HTML-звіти для всього проекту або кожного робочого набору (Working set). Робочий набір дозволяє розділити весь програмний проект на дрібні частини для більш наочного аналізу. У робочий набір можна помістити вибрані користувачем пакети та класи для подальшого аналізу. HTML звіт складається із чотирьох частин: інформаційна панель (Dashboard), докладний список метрик, пояснення метрик, графіки.

Metrics Reloaded. Плагін для IDE IntelliJ, що дозволяє розраховувати метрики кількості рядків коду та файлів для багатьох мов програмування, а також багато інших метрик для програм, написаних мовою програмування Java. Цей інструмент є проектом з відкритим вихідним кодом (Open Source) і доступний як у GitHub репозиторії автора [19], так і в магазині плагінів Jetbrains Marketplace для IDE IntelliJ [20].

Плагін сумісний з багатьма продуктами IntelliJ Platform Community та Ultimate Edition, серед яких IntelliJ IDEA, Android Studio, PhpStorm, WebStorm та інші. Для встановлення даного плагіну, в IDE IntelliJ в налаштуваннях конфігурації плагінів достатньо набрати MetricsReloaded. На сторінці завантаження доступні різні версії плагіна, які сумісні з різними версіями платформи IntelliJ, у тому числі досить старими.

Цей інструмент дозволяє розраховувати велику кількість різноманітних метрик. Важливо, що є можливість отримати значення всіх метрик з набору CK Metrics. Крім того, розраховуються й інші метрики, серед яких:

– Кількість класів (Class count). Інформація про загальну кількість класів, класів продукту (ті, що не є частиною тестів), та класів, які є частиною коду тестування;

– Залежності (Dependency). Детальні метрики по залежностям. Надається інформація про циклічні залежності та транзитивні залежності класів, а також про залежності кожного класу;

– Складність (Complexity). Подробиці цикломатичної складності, розширених цикломатичних залежностей методів;

– JUnit-тестування (JUnit Testing). Інформація про кількість тверджень (assertions) та методів тесту JUnit;

– Кількість документації Javadoc (Javadoc Coverage). Простий підрахунок кількості рядків документації Javadoc;

– Кількість рядів коду (Lines of Code, LOC). Підрахунок загальної кількості рядків коду, а також розподіл робочого (production) та тестового коду;

– Набір метрик MOOD (Model for Object Oriented Design), визначених Фернандо Бріто е Абреу (Fernando Brito e Abreu) і розроблених для того, щоб надати узагальнення загальної якості ОО проекту. Оригінальний набір метрик MOOD складається з 6 метрик;

– Метрики Роберта Мартіна. Вони відноситься до набору показників, які автор згадує у своїй книзі [21]. Це такі метрики, як: еферентне зчеплення (Efferent Coupling, Ce), аферентне зчеплення (Afferent Coupling, Ca), нестабільність (Instability, I), абстрактність (Abstractness, A), нормалізована відстань від головної послідовності (Normalized Distance from Main Sequence, D).

Metrics Reloaded дозволяє отримати метрики для всього проекту, конкретного модуля, поточного файлу або навіть для якоїсь частини проекту. Це робить його досить гнучким з огляду на те, що потрібно проаналізувати. На рис. 2 показний приклад отриманих числових значень набору CK Metrics для кожного класу проаналізованого проекту в IDE Intellij IDEA.

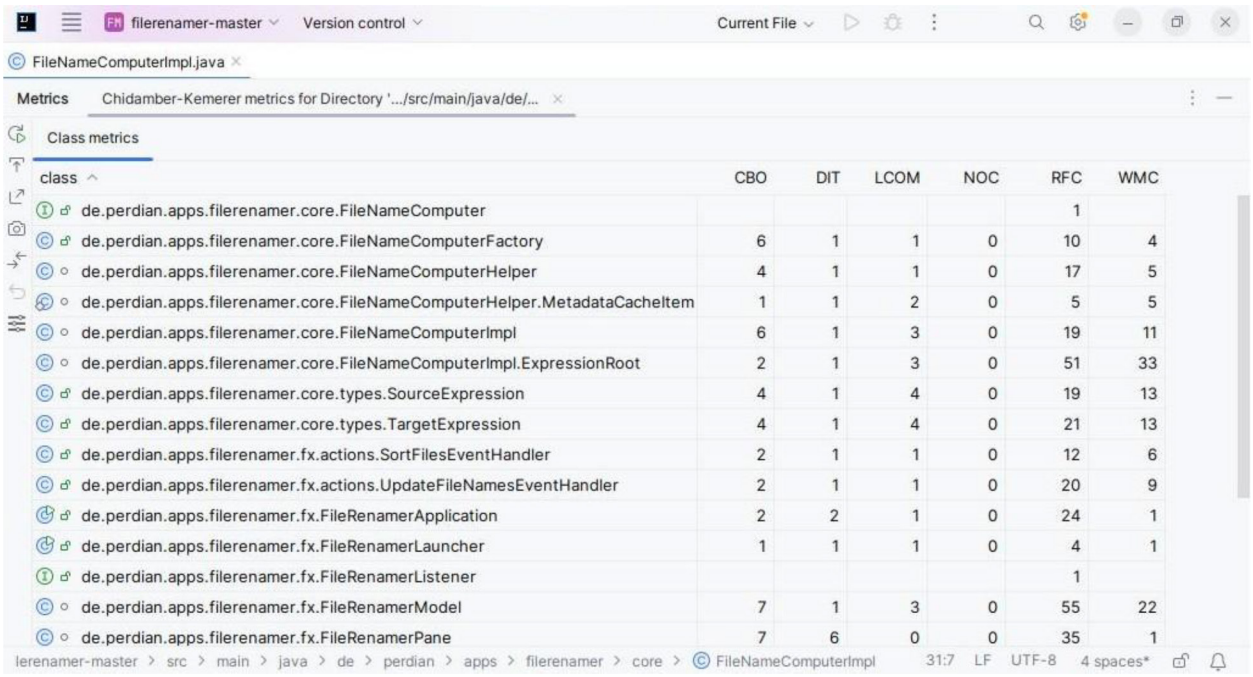


Рис. 2. Вікно з отриманими числовими значеннями набору CK Metrics для кожного класу в IDE Intellij IDEA

Можна налаштувати свій набір лише тих метрик, які потрібно проаналізувати. Є можливість визначати порогові значення метрик, які можна використовувати для відображення тільки тих, які перевищують певний поріг (за замовчуванням відображається все). Розраховані числові значення метрик відображаються у табличному вигляді у самій IDE. Крім того, передбачена можливість переглянути діаграму розподілу або гістограму значень, кругову діаграму (там де це можливо).

Для того щоб розпочати роботу з Metrics Reloaded, перш за все потрібно виконати аналіз відкритого проекту у IDE Intellij IDEA. Для цього в меню вибираємо команду Code-Calculate metrics. Після цього в модальному вікні, в розділі Metrics scope вибираємо Цілий проект (Whole project), а в розділі Metrics profile, вибираємо один з предвстановлених профілів набору метрик. Профіль представляє собою просто набір тих чи інших метрик за якими програмний проект буде проаналізовано. Можна створити власний профіль додавши метрики, які підтримує плагін. На рис. 2 показані проаналізовані числові значення метрик з набору CK Metrics після вибору предвстановленого профілю Chidamber-Kemerer metrics.

Metrics Tree – плагін для IDE IntelliJ, що дозволяє розраховувати безліч різних метрик для програм, написаних мовою програмування Java. Цей інструмент є проектом з відкритим вихідним кодом (Open Source) і доступний як у GitHub репозиторії автора [22], так і в магазині плагінів Jetbrains Marketplace для IDE IntelliJ [23].

MetricsTree підтримує набори метрик на рівні проекту, пакета, класу та методу. Важливо, що цей інструмент дозволяє розраховувати значення всіх метрик із набору CK Metrics. Крім того, розраховуються і багато інших метрик коду.

Далі наведені рівні, на яких розраховуються ті чи інші метрики:

Для всіх рівнів (всього проекту, пакета, класу, методу): кількість рядків коду (LOC), набір метрик Холстеда, зручність обслуговування (index maintainability).

Для рівнів всього проекту та пакета: кількість не закоментованих ділянок коду, кількість звичайних, абстрактних, статичних класів, інтерфейсів.

Рівень проекту: набори метрик MOOD та QMOOD. Метрики QMOOD (Quality Model for Object Oriented Design) визначають зв'язок між атрибутами якості (такими як можливість повторного використання, функціональність, ефективність, зрозумілість, розширюваність, гнучкість).

Рівень пакету: набір метрик Роберта Мартіна.

Рівень класу: набори метрик Чідамбера-Кемерера, Лоренца-Кідда, Лі-Генрі, Ланца-Марінеску, Бімана-Канга.

Рівень методу: цикломатична складність МакКейба (CC), максимальна глибина вкладеності, глибина вкладеності циклів, глибина вкладеності умов, кількість циклів, локальність доступу до атрибутів (LAA), зовнішні постачальники даних (FDP), кількість доступних змінних (NOAV), інтенсивність зв'язку (CINT), дисперсія зв'язку (CDISP).

У вікні, показаному на рис. 3, відображаються числові значення різних метрик одного з класів проекту, відкритого у IDE IntelliJ IDEA.

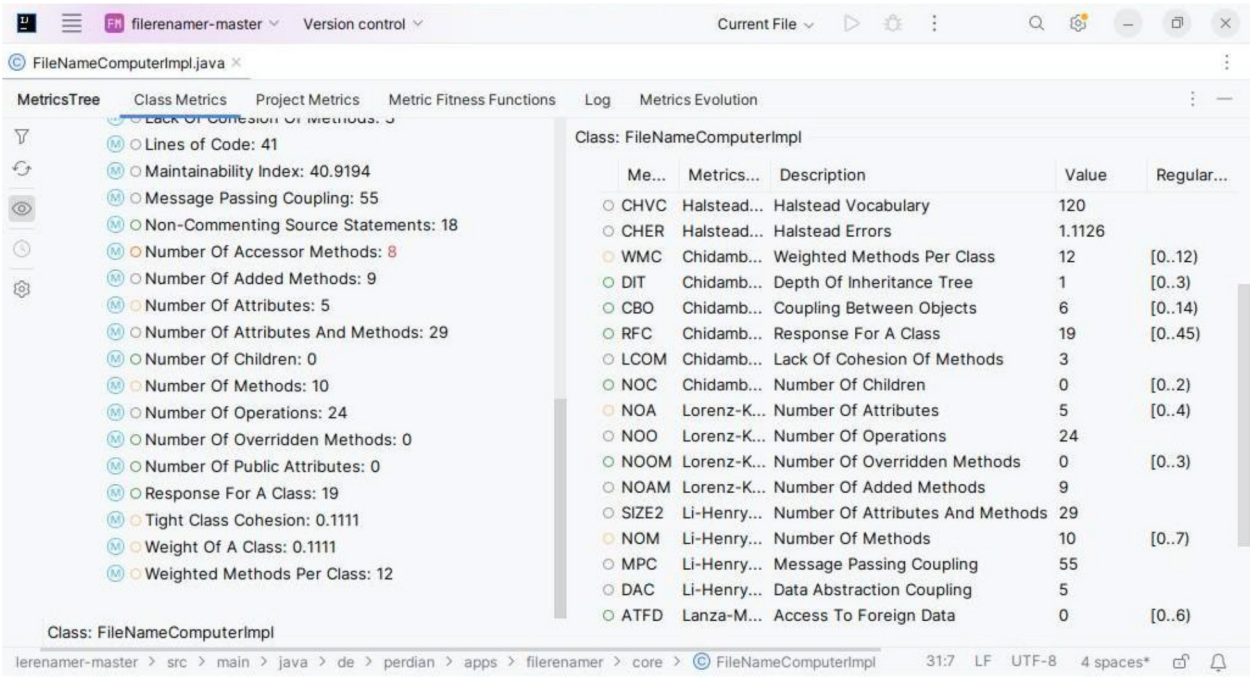


Рис. 3. Вікно з отриманими числовими значеннями різних метрик для одного класу в IDE Intellij IDEA

Даний інструмент представляє результати розрахунку метрик не тільки у вікні структурованого деревоподібного вигляду, як показано на рис. 3, а й у вигляді таблиць, дерев та деревоподібних карт. Підтримує контроль значень метрик, що обчислюються. Відображає різні властивості метрики (розподілу, кореляції) на діаграмах. Показує еволюцію значень метрик класу з урахуванням журналу git. Крім того, MetricsTree дозволяє знаходити загальні антипатерни і визначати нові.

Для того щоб розпочати роботу з Metrics Tree, перш за все потрібно відкрити панель інструментів плагіну Metrics Tree. Для цього в меню вибираємо команду View – Tool windows і в переліку знаходимо Metrics Tree. Даний плагін показує числові значення метрик з набору CK Metrics для відкритого Java класу в IDE Intellij IDEA. Попередній аналіз всього проекту, як у плагіні Metrics Reloaded робити не потрібно. Отже відкриваємо будь який Java клас з панелі проекту. У панелі інструментів плагіну, у вкладці Class metrics будуть відображені числові значення різних метрик, в тому числі з набору CK Metrics, як показано на рис. 3.

Передбачена можливість експорту числових значень метрик (в тому числі з набору CK Metrics) у CSV, або XML файл. Для цього переходимо на вкладку Project metrics. В цьому випадку потрібно виконати команду отримання метрик програмного проекту – натискаємо кнопку Calculate project metrics. Після цього можна виконувати експорт числових значень метрик.

Короткий порівняльний аналіз всіх інструментів представлений в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз всіх інструментів для отримання числових значень метрик набору CK Mertics

Назва інструменту	Підтримка мов програмування	Аналізуємі файли	Інтерфейс взаємодії з програмою	Перша версія інструменту (рік)	Ліцензія
CK	Java	Файли вихідного коду (.java)	CLI	2015	Apache 2.0 (Open source)
ckjm	Java	Байт код JVM (.class)	CLI	2005	Apache 2.0 (Open source)
ckjm-extended	Java	Байт код JVM (.class)	CLI	2009	Apache 2.0 (Open source)
CodeMR	Java, Kotlin, Scala	Проект в Intellij IDEA	Плагін Intellij IDEA	2018	Комерційна з пробною версією на 7 днів
Metrics Reloaded	Java	Проект в Intellij IDEA	Плагін Intellij IDEA	2004	Apache 2.0 (Open source)
Metrics Tree	Java	Проект в Intellij IDEA	Плагін Intellij IDEA	2020	Apache 2.0 (Open source)

Перш за все треба зазначити, що всі інструменти підтримують повний набір CK Metrics. З точки зору ліцензування, можна побачити, що всі програми, окрім CodeMR мають відкриту ліцензію і відносяться до категорії Open source, тобто є безкоштовними.

В науковому середовищі CK – достатньо розповсюджений інструмент. До переваг CK можна віднести велику спільноту розробників. Особливість CK в тому, що він зберігає результати аналізу тільки в файл в CSV форматі. Тому результати аналізу CK потрібно обробляти вручну за допомогою табличного процесора (MS Excel, LibreOffice Calc), або спеціалізованих програм.

До особливостей програм ckjm, ckjm-extended можна віднести формат вхідних даних – файли байт-коду (.class) у форматі JVM. Це може створити проблему при отриманні числових значень метрик з Android проектів. Та все ж незважаючи на це, треба звернути увагу на інструмент ckjm (ckjm-extended є продовженням ckjm) тому, що він був створений спеціально для розрахунку метрик з набору CK Metrics.

До недоліків інструментів CK, ckjm та ckjm-extended можна віднести взаємодію через інтерфейс командного рядка. Це може викликати труднощі у користувачів, які не звикли працювати з терміналом (або не мають досвіду роботи з терміналом).

CodeMR – платний (комерційний) плагін для IDE Intellij IDEA, але має повнофункціональну пробну версію на 7 днів. Переваги CodeMR: підтримка сучасних мов програмування, велика кількість підтримуваних метрик, надзвичайно велика кількість візуального відображення числових значень метрик, генерація HTML-звітів за результатами аналізу проекту, який відображається у веб-браузері. Треба наголосити, що CodeMR – достатньо потужний інструмент, і для його опанування потрібен деякий час.

Інструменти Metrics Reloaded та Metrics Tree приблизно однакові, але Metrics Tree має можливість візуального відображення числових значень метрик.

Висновки

В даній роботі акцент був зроблений на аналізі інструментів для отримання числових значень ОО метрик Чидамбера і Кемерера з програм, розроблених мовою програмування Java.

Результати дослідження можуть дозволити зробити обґрунтований вибір інструментального засобу для отримання числових значень метрик Чидамбера та Кемерера, виходячи з конкретних вимог розробника або дослідника. Також результати дослідження можуть допомогти досягти потрібного результату з меншою витратою сил на самостійне вивчення можливостей відповідного інструментального засобу.

З суб'єктивної точки зору авторів, найбільш функціональним та зручним у користуванні є плагін CodeMR. Далі приблизно однакове місце займають CK, Metrics Reloaded та Metrics Tree. За ними йдуть ckjm, ckjm-extended, які потребують деякої підготовки для роботи з ними.

Також маємо за необхідне рекомендувати перед застосуванням будь-якого інструменту ознайомитися з інтерпретацією метрик в офіційній документації. Однозначно виділити той чи інший інструмент – достатньо важке завдання. Все залежить від поставленої задачі та досвіду користувача.

Список використаної літератури

1. ISO, ISO/IEC TR 9126-2: Software Engineering – Product Quality – Part 2: External Metrics. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2003.

2. ISO, ISO/IEC TR 9126-3: Software Engineering – Product Quality – Part 3: Internal Metrics. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2003.

3. J.D. van Leusen. Tool support for software metrics calculation of Java projects. 2014. URL: https://fse.studenttheses.ub.rug.nl/11928/1/INF-BA-2014-J.D.van.Leusen.pdf (дата звернення: 20.05.2025).

4. Sandeep Kaur, Navjot Kaur. Software Metrics and Metric Tools – A Review. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. Vol. 3, Issue: 4. 2015. URL: https://www.academia.edu/28255167/Software_Metrics_and_Metric_Tools_A_Review (дата звернення: 20.05.2025).

5. Kayarvizhy N. Systematic Review of Object Oriented Metric Tools. *International Journal of Computer Applications*. 135, no. 2 (2016): PP. 8–13. URL: https://www.ijcaonline.org/research/volume135/number2/n-2016-ijca-908269.pdf (дата звернення: 20.05.2025).

6. Shyam R. Chidamber, Chris F. Kemerer. Object-Oriented Metrics Suite. 2021. URL: https://www.aivosto.com/project/help/pm-oo-ck.html (дата звернення: 23.06.2023).

7. Shyam R. Chidamber, Chris F. Kemerer. A metrics suite for object oriented design. 1993. URL: https://www.eso.org/~tcsmgr/oowg-forum/TechMeetings/Articles/OOMetrics.pdf (дата звернення: 25.06.2023).

8. Chidamber S. R., Kemerer C. F. Towards a Metrics Suite for Object Oriented Design. *Conference Proceedings on Object-Oriented Programming Systems, Languages, and Applications*. Phoenix Arizona USA: ACM. PP. 197–211. 1991. URL: https://doi.org/10.1145/117954.117970. (дата звернення: 19.07.2024).

9. Chidamber and Kemerer object-oriented metrics suite. URL: https://www.aivosto.com/project/help/pm-oo-ck.html (дата звернення: 23.06.2023).

10. TIOBE Index for May 2025. The TIOBE Programming Community index is an indicator of the popularity of programming languages. 2025. URL: https://www.tiobe.com/tiobe-index/ (дата звернення: 24.05.2025).

11. Maurício Aniche. Ck – Code metrics for Java code by means of static analysis. 2024. URL: https://github.com/mauricioaniche/ck (дата звернення: 01.07.2023).

12. Spinellis, D. Ckjm – A Tool for Calculating Chidamber and Kemerer Java Metrics. *IEEE Software*. URL: https://www.spinellis.gr/sw/ckjm/doc/indexw.html (дата звернення: 01.07.2023).

13. Marian Jureczko. CKJM extended – An extended version of Tool for Calculating Chidamber and Kemerer Java Metrics (and many other metrics). Home page. 2024. URL: https://gromit.iiar.pwr.wroc.pl/p_inf/ckjm (дата звернення: 11.06.2024).

14. Marian Jureczko. CKJM extended – An extended version of Tool for Calculating Chidamber and Kemerer Java Metrics (and many other metrics). Introduction. 2024. URL: https://gromit.iiar.pwr.wroc.pl/p_inf/ckjm/intro.html (дата звернення: 11.06.2024).

15. Marian Jureczko. CKJM extended – An extended version of Tool for Calculating Chidamber and Kemerer Java Metrics (and many other metrics). 2024. URL: https://github.com/mjureczko/CKJM-extended (дата звернення: 11.06.2024).

16. CodeMR is a software quality and static code analysis tool for Java, Kotlin and Scala projects. JetBrains Marketplace. 2025. URL: https://plugins.jetbrains.com/plugin/10811-codemr (дата звернення: 23.05.2025).

17. CodeMR Static Code Analyser. Eclipse Marketplace. 2025. URL: https://marketplace.eclipse.org/content/codemr-static-code-analyser (дата звернення: 04.07.2024).

18. CodeMR – Measure, visualise and improve your code quality. Home page. 2025. URL: https://www.codemr.co.uk/ (дата звернення: 23.05.2025).

19. MetricsReloaded – Automated source code metrics plugin for IntelliJ IDEA. 2025. URL: https://github.com/BasLeijdekkers/MetricsReloaded (дата звернення: 23.05.2025).

20. MetricsReloaded – Automated Source Code Metrics for IntelliJ IDEA and IntelliJ Platform IDEs Plugin. 2025. URL: https://plugins.jetbrains.com/plugin/93-metricsreloaded (дата звернення: 23.05.2025).

21. Robert Cecil Martin. Agile Software Development: Principles, Patterns, and Practices. 2003. Prentice Hall PTR, USA.

22. MetricsTree is an IDE extension that helps to evaluate quantitative properties of Java code. GitHub repository. 2025. URL: https://github.com/b333vv/metricstree (дата звернення: 23.05.2025).

23. MetricsTree is an IDE extension that helps to evaluate quantitative properties of java code. JetBrains Marketplace. 2025. URL: https://plugins.jetbrains.com/plugin/13959-metricstree (дата звернення: 23.05.2025).

References

1. ISO, ISO/IEC TR 9126-2. (2003). Software Engineering – Product Quality – Part 2: External Metrics. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

2. ISO, ISO/IEC TR 9126-3. (2003). Software Engineering – Product Quality – Part 3: Internal Metrics. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

3. J. D. van Leusen. (2014). Tool support for software metrics calculation of Java projects. https://fse.studenttheses.ub.rug.nl/11928/1/INF-BA-2014-J.D.van.Leusen.pdf

4. Sandeep Kaur & Navjot Kaur. (2015). Software Metrics and Metric Tools – A Review. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. Vol. 3 Issue 4. https://www.academia.edu/28255167/Software_Metrics_and_Metric_Tools_A_Review

5. Kayarvizhy N. (2016). Systematic Review of Object Oriented Metric Tools. *International Journal of Computer Applications*. 135, no. 2. pp. 8–13. https://www.ijcaonline.org/research/volume135/number2/n-2016-ijca-908269.pdf

6. Shyam R. Chidamber & Chris F. Kemerer. (2021). Object-Oriented Metrics Suite. https://www.aivosto.com/project/help/pm-oo-ck.html

7. Shyam R. Chidamber & Chris F. Kemerer. (1993). A metrics suite for object oriented design. https://www.eso.org/~tcsmgr/oowg-forum/TechMeetings/Articles/OOMetrics.pdf

8. Chidamber S. R. & Kemerer C. F. (1991). Towards a Metrics Suite for Object Oriented Design. *Conference Proceedings on Object-Oriented Programming Systems, Languages, and Applications*. Phoenix Arizona USA: ACM. pp. 197–211. https://doi.org/10.1145/117954.117970

9. Chidamber and Kemerer object-oriented metrics suite. https://www.aivosto.com/project/help/pm-oo-ck.html

10. TIOBE Index for May 2025. The TIOBE Programming Community index is an indicator of the popularity of programming languages. (2025) https://www.tiobe.com/tiobe-index/

11. Maurício Aniche. (2024). Ck – Code metrics for Java code by means of static analysis. https://github.com/mauricioaniche/ck

12. Spinellis, D. (2011). Ckjm – A Tool for Calculating Chidamber and Kemerer Java Metrics. IEEE Software. https://www.spinellis.gr/sw/ckjm/doc/indexw.html

13. Marian Jureczko. (2024). CKJM extended – An extended version of Tool for Calculating Chidamber and Kemerer Java Metrics (and many other metrics). Home page. https://gromit.iiar.pwr.wroc.pl/p_inf/ckjm

14. Marian Jureczko. (2024). CKJM extended – An extended version of Tool for Calculating Chidamber and Kemerer Java Metrics (and many other metrics). Introduction. https://gromit.iiar.pwr.wroc.pl/p_inf/ckjm/intro.html

15. Marian Jureczko. (2024). CKJM extended – An extended version of Tool for Calculating Chidamber and Kemerer Java Metrics (and many other metrics). https://github.com/mjureczko/CKJM-extended

16. CodeMR is a software quality and static code analysis tool for Java, Kotlin and Scala projects. JetBrains Marketplace. (2025). https://plugins.jetbrains.com/plugin/10811-codemr

17. CodeMR Static Code Analyser. Eclipse Marketplace. (2025). https://marketplace.eclipse.org/content/codemr-static-code-analyser

18. CodeMR – Measure, visualise and improve your code quality. Home page. (2025). https://www.codemr.co.uk/

19. MetricsReloaded – Automated source code metrics plugin for IntelliJ IDEA. (2025). https://github.com/BasLeijdekkers/MetricsReloaded

20. MetricsReloaded – Automated Source Code Metrics for IntelliJ IDEA and IntelliJ Platform IDEs Plugin. (2025). https://plugins.jetbrains.com/plugin/93-metricsreloaded

21. Robert Cecil Martin. (2003). Agile Software Development: Principles, Patterns, and Practices. Prentice Hall PTR, USA.

22. MetricsTree is an IDE extension that helps to evaluate quantitative properties of java code. GitHub repository. (2025). https://github.com/b333vv/metricstree

23. MetricsTree is an IDE extension that helps to evaluate quantitative properties of java code. JetBrains Marketplace. (2025). https://plugins.jetbrains.com/plugin/13959-metricstree

УДК 004.9 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.27

В. О. МАРТОВИЦЬКИЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0003-2349-0578

О. В. ШЕХОВЦОВ
аспірант кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0002-7400-2925

Д. С. АЛЕЙНИК
магістр кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0000-6532-7918

Є. В. ПАХОМОВА
магістр кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0009-9595-6331

Д. І. ІВАНЧЕНКО
магістр кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0005-3533-5163

ПІДХІД ДО ВИЯВЛЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ РАДІОКЕРОВАНИХ МОДЕЛЕЙ ЗА ЇХ РАДІОСИГНАЛОМ

Постійний розвиток недорогих вбудованих датчиків, мікроконтролерів та технологій бездротової передачі даних призвів до стрімкого зростання популярності та використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), або дронів, у різних сферах людської діяльності – від сільського господарства та екологічного моніторингу до військових застосувань і розвідки. Проте, одночасно із перевагами, які надають дрони, зростає і ризик їхнього зловмисного використання. Безпілотники можуть становити серйозну загрозу безпеці населення, стратегічних об'єктів, приватних територій та промислових підприємств. У зв'язку з цим виникає гостра потреба у створенні систем виявлення та класифікації таких пристроїв на основі аналізу їхніх радіочастотних сигналів. У даній роботі розглядається підхід до моніторингу та ідентифікації дронів шляхом аналізу радіосигналів, які генеруються їхніми модулями зв'язку. Зокрема, запропонована система базується на можливостях програмно-визначеної радіостанції (SDR), що дозволяє в реальному часі здійснювати прийом, обробку та аналіз сигналів без необхідності використання спеціалізованого апаратного забезпечення. Для реалізації цього підходу використано фреймворк GNU Radio, який забезпечує гнучкість у побудові блок-схем обробки сигналів. Особливу увагу приділено задачі класифікації сигналів зв'язку дронів на основі типу модуляції – зокрема, мультиплексування з ортогональним частотним поділом (OFDM). Аналіз сигналу базується на його енергетичних характеристиках та структурних параметрах, які залежать від використаного протоколу. За допомогою алгоритмів машинного навчання здійснюється автоматизоване навчання моделі для подальшого розпізнавання радіосигналів у польових умовах. Це дозволяє визначати тип пристрою, оцінювати його поведінку, а в деяких випадках – локалізувати джерело сигналу без втручання в сам пристрій. Таким чином, запропоноване дослідження демонструє ефективність підходу до розпізнавання та класифікації БПЛА за допомогою SDR та методів штучного інтелекту, що може бути основою для створення систем раннього попередження та протидії несанкціонованому використанню дронів.

Ключові слова: *класифікація радіосигналів, радіочастотні сигнали, програмно-визначена радіостанція, машинне навчання.*

V. O. MARTOVYTSKYI
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0003-2349-0578

O. V. SHEKHOVTSOV
Postgraduate Student at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0002-7400-2925

D. S. ALEYNIK
Master's Student at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0000-6532-7918

E. V. PAKHOMOVA
Master's Student at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0009-9595-6331

D. I. IVANCHENKO
Master's Student at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0005-3533-5163

APPROACH TO DETECTION AND CLASSIFICATION OF RADIO-CONTROLLED MODELS BY THEIR RADIO SIGNAL

The ongoing development of affordable embedded sensors, microcontrollers, and wireless communication technologies has led to a rapid rise in the popularity and use of unmanned aerial vehicles (UAVs), commonly known as drones, across various fields – including agriculture, environmental monitoring, reconnaissance, and defense. However, alongside these benefits, the potential for malicious or unauthorized drone usage poses significant risks to public safety, critical infrastructure, private property, and industrial facilities. Therefore, there is an increasing need for systems capable of detecting and classifying drones based on the analysis of their radio frequency (RF) communication signals. This paper explores an approach for monitoring and identifying drones by analyzing the RF signals generated by their communication modules. Specifically, the proposed system leverages the capabilities of a software-defined radio (SDR), which enables real-time signal reception, processing, and analysis without the need for specialized hardware. The implementation utilizes the GNU Radio framework, offering flexibility in designing custom signal processing workflows. The focus is placed on classifying drone communication signals based on their modulation type – particularly, orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM). Signal classification is achieved by analyzing its energy profile and structural features, which vary depending on the communication protocol used. Machine learning algorithms are employed to train a model that can recognize and classify such signals in real-world environments. This enables the identification of the device type, behavior analysis, and, in some cases, estimation of the operator's location – all without direct interaction with the drone. Overall, the study demonstrates the effectiveness of combining SDR technology with artificial intelligence methods for drone detection and classification, potentially forming the basis for early warning systems and countermeasures against unauthorized drone activity.

Key words: *radio signal classification, radio frequency signals, software-defined radio, machine learning.*

Постановка проблеми

У сучасному світі безпілотні літальні апарати (БПЛА), або дрони, стали невід'ємною частиною багатьох сфер життя, включаючи рекреаційне, комерційне, освітнє та військове використання. Швидкий розвиток технологій, зокрема впровадження недорогих вбудованих сенсорів, сприяв масовому поширенню дронів серед цивільних користувачів. У літературі та в інформаційних джерелах все експлуатаційне обладнання, яке складається з літака, станції радіо керування та бездротового зв'язку між літальним апаратом та його системою керування, описується як безпілотний літальний апарат або радіокерована модель. Безпілотний літальний апарат – це термін, який в основному використовується для визначення літаючих об'єктів для різних застосувань. Термін «дрон» є більш поширеним серед любителів і по суті є безпілотним або автономним літальним апаратом, який зазвичай використовується у військовому контексті, а також використовується для позначення будь-якої з численних доступних класифікацій або типів літальних безпілотних апаратів загальною мовою. Можна помітити, що в останні роки до безпілотних літальних апаратів (БПЛА) виявляють великий інтерес в різних дослідженнях через їх широкий спектр використання.

Однак, разом із зростанням популярності дронів, з'явилися нові виклики, пов'язані з їхнім використанням, зокрема загрози безпеці, конфіденційності та навіть національній безпеці.

Виявлення та класифікація дронів за їхніми радіосигналами стає все більш актуальною задачею для дослідників і фахівців у галузі радіоелектроніки. Це пов'язано з тим, що дрони можуть використовуватися як для корисних цілей,

так і для порушення закону, наприклад, для несанкціонованого збору даних, контрабанди або навіть атак. Тому розробка ефективних методів виявлення та ідентифікації дронів є важливим кроком у забезпеченні безпеки суспільства.

У цій статті розглядається підхід до виявлення та класифікації радіокерованих моделей за їхніми радіосигналами. Особлива увага приділяється аналізу радіочастотних сигналів (RF-сигналів), які використовуються для зв'язку між дроном і наземною станцією. Також обговорюються сучасні технології, такі як програмно-визначені радіостанції (SDR) та методи машинного навчання, які дозволяють ефективно класифікувати сигнали на основі їхніх характеристик, таких як модуляція та параметри ортогонального частотного мультиплексування (OFDM).

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останні роки відзначені значним зростанням інтересу до проблеми виявлення дронів, що пов'язано з їхнім масовим поширенням та потенційними загрозами, які вони можуть становити. У науковій літературі представлено багато підходів до вирішення цієї проблеми, включаючи використання радарів, акустичних сенсорів, відеоспостереження та аналізу радіочастотних сигналів.

У статті [1] запропонована нова структура глибокого навчання ансамблю моделей, яка має гібридні синтетичні та глибокі функції для виявлення несанкціонованих або зловмисних БПЛА за допомогою акустичних сигналів, зображень/відео та бездротових радіочастотних (РЧ) сигналів для надійного виявлення та класифікації БПЛА. Представлено оцінку продуктивності запропонованого підходу з використанням чисельних результатів, отриманих в результаті експериментів.

У роботі [2] автори використали наступний підхід:

– по-перше, для вибірки даних обрали метод стисненого зондування замість традиційної теореми вибірки і використали багатоканальний випадковий демодулятор для вибірки сигналу;

– по-друге, для виявлення та ідентифікації присутності, типу та схеми польоту БПЛА було запропоновано багатоетапний метод ідентифікації та виявлення БПЛА на основі глибокого навчання, який використовує різницю в сигналах зв'язку між БПЛА та контролерами за різних обставин.

Зразки даних спочатку проходять через детектори, які виявляють наявність БПЛА, потім використовуються класифікатори для ідентифікації типу БПЛА. Моделі польоту оцінюються відповідними класифікаторами, для чого за допомогою алгоритмів глибокого навчання будуються дві нейромережеві структури (DNN і CNN), які оцінюються і підтверджуються методом 10-кратної перехресної перевірки, причому мережа DNN використовується для детекторів, а мережа CNN – для подальшої класифікації типу і режиму польоту. Результати експерименту демонструють ефективність використання стисненого зондування для дискретизації сигналів зв'язку БПЛА і наземних станцій.

У статті [3] автори запропонували систему виявлення та класифікації БПЛА різними методами, включаючи підхід на основі аудіо. Однак кількість загальнодоступних аудіоданих БПЛА обмежена. Щоб заповнити цю прогалину, автори вибрали 10 різних БПЛА, починаючи від іграшкових ручних дронів і закінчуючи дронами класу I, і записали аудіодані загальною тривалістю 5215 секунд. На основі зібраних даних реалізували модель згорткової нейронної мережі (CNN) для класифікації БПЛА за 10 класами. Загальна точність тестування навченої моделі становить 97,7 %, а втрата тесту становить 0,085.

У роботі [4] досліджується проблема ідентифікації безпілотних літальних апаратів за їх радіолокаційною сигнатурою (RCS). RCS шести комерційних БПЛА вимірюється на частотах 15 ГГц і 25 ГГц у безеховій камері для вертикальної та горизонтальної поляризації. Отримані сигнатури RCS використовувалися для навчання 15 різних алгоритмів класифікації, кожен з яких належить до однієї з трьох категорій: статистичне навчання, машинне навчання та глибоке навчання. Дослідження показує, що хоча точність класифікації всіх алгоритмів зростає із збільшенням співвідношення сигнал/шум, алгоритми машинного навчання досягають вищої точності порівняно з алгоритмами статистичного навчання та глибокого навчання.

Автори роботи [5] пропонують підхід, заснований на техніці синтезу глибокого навчання, який об'єднує частотно-модульовані радіолокаційні мікродоплерівські сигнали безперервної хвилі, сигнали діаграми швидкості обертання і сигнали кепстра. Цей синтез завершується класифікацією БПЛА з винятковою точністю. У цьому дослідженні було застосовано два підходи до глибокого навчання з використанням мережі ResNet34: злиття на рівні даних і злиття на рівні функцій.

У даному розділі було проведено аналіз публікацій, присвячених методам виявлення та класифікації радіокерованих моделей. На основі досліджень виявлено, що сучасні підходи до вирішення цієї задачі базуються на використанні методів машинного навчання, цифрової обробки сигналів та аналізу спектральних характеристик. Особливу увагу приділено методам, які дозволяють ідентифікувати тип радіокерованої моделі, її параметри та джерело сигналу навіть у умовах наявності перешкод або шумів.

Аналіз показав, що існуючі методи мають високий потенціал для застосування у сфері безпеки, моніторингу та контролю радіоефіру. Проте, існують певні обмеження, пов'язані зі складністю розпізнавання сигналів у реальному часі, а також з необхідністю вдосконалення алгоритмів для підвищення точності класифікації. Майбутні дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію глибокого навчання та адаптивних методів обробки сигналів для покращення ефективності розпізнавання радіокерованих моделей.

Таким чином, розробка нових підходів до виявлення та класифікації радіокерованих моделей за їх радіосигналами є актуальною задачею, яка потребує подальших досліджень та впровадження сучасних технологій.

Формулювання мети дослідження

Метою є розробка підходу до виявлення та класифікації радіокерованих моделей за їх радиосигналом.

Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати радіочастотні сигнали, які використовуються для зв'язку між дроном і наземною станцією. Також розробити модель комп'ютерної системи на основі програмно-визначені радіостанції та методів машинного навчання, які дозволяють ефективно класифікувати сигнали на основі їхніх характеристик, таких як модуляція та параметри ортогонального частотного мультиплексування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для більш точного розуміння запропонованого підходу розглянемо спочатку особливості функціонування БПЛА.

Дрон складається з двох основних частин – пульта дистанційного керування та літального апарату. Обидві частинби зв'язуються між собою за допомогою радіочастотного каналу зв'язку. На рисунку 1 представлено архітектуру, конструкцію та компоненти більшості дронів.

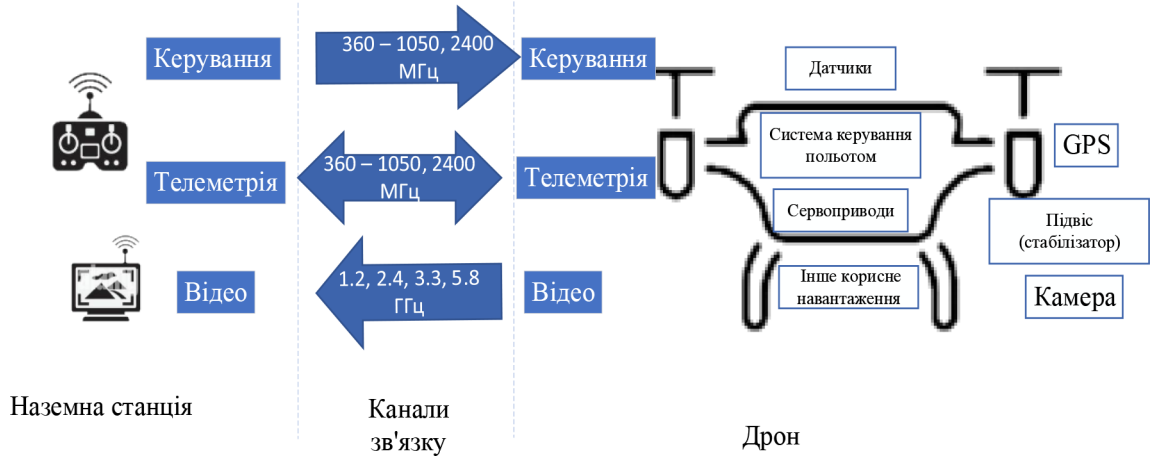


Рис. 1. Компоненти БПЛА

Для радіочастотної класифікації зосередимося на зв'язку між землею (пульт дистанційного керування) і БПЛА. Пульт дистанційного керування може безпосередньо керувати дроном за допомогою засобів керування, передачі даних і відео, обмінюватися та надсилати інформацію один одному. Більшість контролерів використовують спектр у діапазонах 868, 915 та 2400 МГц (обладнання дозволяє розширити цей діапазон 360–1050 МГц) із власною модуляцією розширеного спектра зі стрибками частоти (FHSS) [6]. FHSS використовується для максимізації надійності та контролю відстані. Цей тип модуляції сигналу використовуються у військових застосуваннях, а також у деяких доступних електронних пристроях, таких як мобільні телефони. Ще одна важлива характеристика цих сигналів полягає в тому, що вони дуже стійкі до перешкод. У військовій сфері ця технологія може мати важливе застосування, оскільки її можна використовувати для низької ймовірності виявлення сигналу. Однак ця властивість ускладнює виявлення дрона. Контролери FHSS також можуть бути ефективними проти глушіння завдяки тому факту, що вони не просто передають інформацію на статичній частоті, а й по всій ширині спектру, в якому стрибає сигнал між дроном та наземною станцією.

У таблиці 1 наведено інформацію, пов'язану з керуючими сигналами деяких доступних дронів, що використовуються аматорами або дослідниками.

Таблиця 1

Характеристики набору даних

Бренд	Частота	Модуляція	Технологія
DJI Phantom	2.4 ГГц / 5.8 ГГц	FHSS/DSSS	FASST/Lightbridge
Futaba	2.4 ГГц	FHSS/DSSS	FASST
Spektrum	2.4 ГГц	FHSS/DSSS	DSMX
JR	2.4 ГГц	FHSS/DSSS	DMSS
Hitec	2.4 ГГц	FHSS/DSSS	AFHSS
Graupner	2.4 ГГц	FHSS/DSSS	HOTT
Yuneec	2.4 ГГц	DSSS	ZigBee
Parrot AR2	2.4 ГГц	OFDM	Wi-Fi
Кастомні FPV	360 – 1050 МГц 1.2 ГГц, 2.4 ГГц, 3.3 ГГц, 5.8 ГГц	FHSS	Lora

Запропонований підхід базується на використати знання про радіочастотне випромінювання від БПЛА, щоб досягти виявлення, виділення ознак і класифікації сигналів дронів за допомогою машинного навчання. Спочатку пропонується виділити OFDM-параметри сигналу безпілотника, а також енергію та інші статистичні характеристики прийнятого сигналу. Іншими словами, для виявлення сигналу будемо реалізовувати енергетичне виявлення бездротового сигналу. В літературі та на практиці існують й інші доступні методи виявлення, але в дослідженні вирішили використати енергетичне виявлення через його простоту, оскільки воно не вимагає великих обчислювальних ресурсів. Після того, як з вхідного сигналу, що нас цікавить, виокремлено ознаки, проводиться додаткова обробка отриманих ознак. Ця обробка включає в себе маркування та навчання на отриманій вибірці зібраних ознак. Це необхідно, оскільки для класифікації сигналів дронів використовуємо методи контрольованого машинного навчання. Для реалізації виявлення, вилучення, класифікації та тестування будуть використані блоки GNU Radio. Навчання та обробка даних буде здійснюватися за допомогою Python. Після завершення навчання на Python буде створено тестовий файл, який буде завантажено в радіоблок GNU Radio для тестування та аналізу в реальному часі.

GNU Radio – це набір інструментів з відкритим вихідним кодом, який був однією з основ для програмно-керованого радіо (SDR). Його активна підтримка спільноти, велика бібліотека інструментів обробки та універсальність є основними перевагами, які приваблюють академічних дослідників, комерційні компанії та студентів до використання фреймворку [7]. Радіо GNU також сумісне з усіма операційними системами персональних комп'ютерів (Ubuntu/Linux, Windows і Mac OS), хоча продуктивність залежить від різних платформ. Наразі було відмічено, що Ubuntu працює краще, оскільки надає користувачам більшу гнучкість і доступ до інших сумісних фреймворків. Його можна використовувати з USRP, HackRF, Raspberry Pi та іншими апаратними компонентами для розробки SDR [7]. C++ використовується як мова для запису обробки сигналів, Python також може використовуватися для запису блоків сигналів, але вони повільніші з точки зору продуктивності, ніж блоки, створені за допомогою C++.

Виявлення енергії буде реалізовано за допомогою програмно-визначеного радіо. Це буде досягнуто за допомогою двох комп'ютерів з встановленим програмним забезпеченням GNU radio companion і двох апаратних засобів HackRf для передачі і прийому.

На рисунку 2 показано блок-схему приймача, в якому відбувається детектування енергії переданого сигналу.

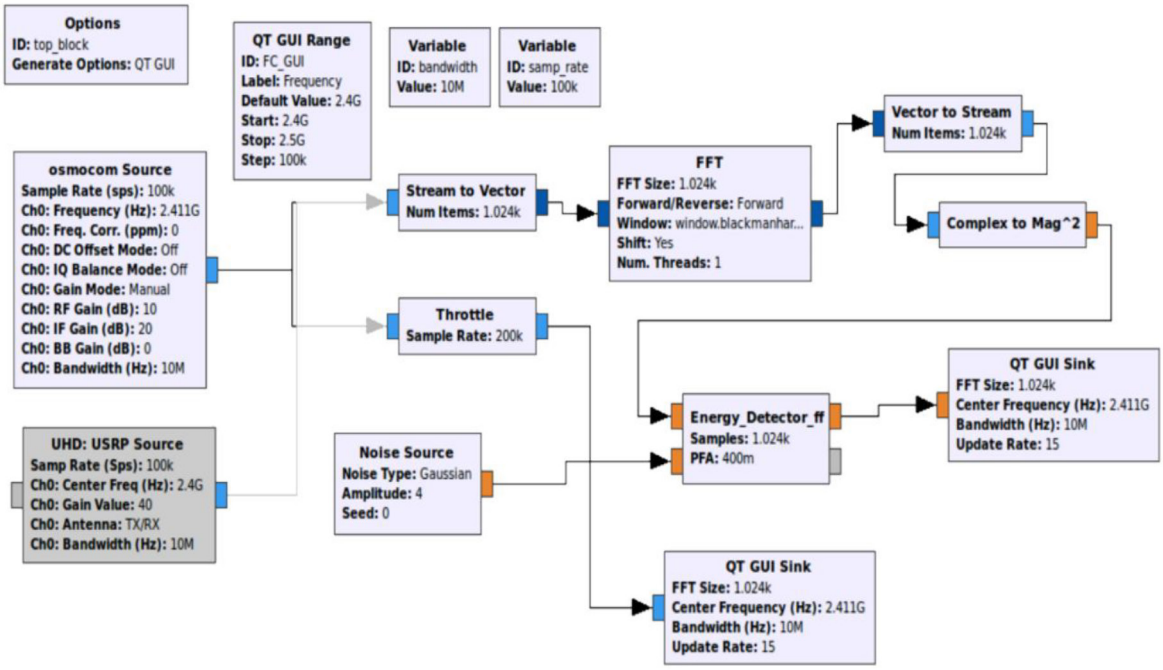


Рис. 2. Блок-схема детектора енергії на GNU Radio

Приймачем є HackRF, де налаштовуються деякі параметри, такі як частота дискретизації, робоча частота і смуга пропускання. Отримані дані сигналу обробляються в комп'ютері, на якому встановлено GNU Radio. Блок throttle використовується для керування завантаженням процесора комп'ютера. Прийнятий сигнал перетворюється у вектор з 1024 точок за допомогою блоку перетворення потоку у вектор (stream to vector). У той же час, вихідний сигнал відображається за допомогою блоку QT GUI Sink. Він відображає спектральної щільності потужності (PSD), водоспад та часової залежності. Після перетворення до 1024 точок йде блок швидкого перетворення фурьє (FFT). Блок FFT виконує швидке перетворення Фур'є над вхідним потоком даних, а вихідні

дані надсилаються до блоку complex to mag². У цьому блоці також виконується віконне перетворення для того, щоб мінімізувати крайові ефекти і запобігти спектральному витоку в спектрі FFT. Для цього було обрано вікно Блекмана-Харріса. Далі відбувається видалення масштабування, зробленого самим блоком FFT. Потім величина комплексного значення підноситься до квадрату ($a + jb \rightarrow a^2 + b^2$) а допомогою блоку complex to mag². Вихід цього блоку надсилається до спеціального блоку Energy-etection-ff, в якому реалізовано алгоритм детектування. Блок дозволяє користувачеві вибрати кількість зразків сигналу та ймовірність хибної тривоги, які будуть використовуватися для розрахунку. Із вхідних даних блок обчислює середнє значення отриманого сигналу, його дисперсію та стандартне відхилення. Ці параметри використовуються для визначення динамічного порога виявлення. Далі розраховуються логарифмічні значення середнього сигналу та порогового рівня. Середня енергія сигналу порівнюється з порогом для визначення наявності сигналу: якщо енергія сигналу перевищує порогове значення, сигнал вважається присутнім, і його енергія передається на вихід.

Для візуалізації використовується QT GUI Sink блок, що відображає потужність отриманих сигналів у частотній області. Для усереднення в детекторному блоці застосовується наступна формула:

$$Y = \sum_{n=1}^{N} \frac{1}{N} X(n)^2, \tag{1}$$

де $X(n)$ відповідає прийнятим значенням в частотній області.

Щоб прийняти рішення про наявність чи відсутність сигналу, потрібно визначити поріг:

$$T = \mu + Q^{-1}(pfa)\sigma, \tag{2}$$

де μ і σ є середнім і стандартним відхиленням усереднених за часом точок БПФ відповідно, Q представляє обернену Q-функцію, а pfa є ймовірністю того, що модуль виявлення вибере H1, тоді як правильним рішенням є $H0$. Правило рішення можна визначити як Рішення про виявлення $Y > T \rightarrow H1$ (сигнал присутній) і $Y <= T \rightarrow H0$ (сигнал відсутній)

Оскільки в роботі пропонується використовувати ортогональне мультиплексування з частотним розділенням каналів, то коротко розглянемо принцип його роботи.

Ортогональне частотне мультиплексування (OFDM) є базовим елементом для багатьох поточних схем модуляції, включаючи; 802.11 WLAN, 802.16 WiMAX і 3GPP LTE [8]. Ортогональне частотне мультиплексування – це цифрова схема модуляції з кількома несучими, яка використовує кілька піднесучих в одному каналі. Він використовує велику кількість близько розташованих ортогональних піднесучих, які передаються паралельно. Кожну піднесучу можна модулювати за допомогою однієї зі звичайних схем цифрової модуляції (таких як QPSK, 16QAM тощо) з низькою швидкістю символу. Однак поєднання більш ніж однієї піднесучої забезпечує швидкість передачі даних, подібну до звичайних схем модуляції з однією несучою в еквівалентних смугах пропускання [8].

Класичний підхід до класифікація OFDM-сигналів здійснюється на основі параметрів центральної частоти, тривалості OFDM-символу, довжини циклічного префікса та кількості піднесучих. Також є підхід до класифікації OFDM сигналів на основі циклостаціонарних ознак [9], де розглядають циклостаціонарну ознаку преамбули кадру та піднесучої.

Також для класифікації використовую такі параметри OFDM-сигналів як: несуча частота, загальна ширина смуги пропускання, кількість піднесучих, відстань між піднесучими, довжина циклічного префікса, період дискретизації та тривалість OFDM-кадру. Для класифікації OFDM-сигналів можна також розглянути наступні параметри: швидкість передачі некодованих даних = 390 млн. біт/с, тривалість вихідного символу TD = 15,385 нс, тривалість символу передачі TS = 12,5 нс, загальна тривалість символу OFDM TS = 3,60 мс, захисний час TG = 0,4 мс, інтервал між піднесучими FS = 0,3125 МГц, ширина смуги Найквіста BN = 76,5625 МГц.

В літературі існують різні доступні параметри, які дослідники використовують як ознаки для класифікації OFDM-сигналу від не OFDM сигналу. В таблиці 2 наведено приклад того, як виглядають деякі з цих параметрів.

У проведеному експерименті використовується чотири параметри. Блок оцінки параметрів OFDM, який оцінює ці параметри, був включений у блок виявлення енергії сигналу, а результат двох блоків об'єднано разом, щоб сформувати один блок оцінки параметрів сигналу. Нижче наведено короткий опис контролюючих параметрів.

Розглянемо визначення довжини циклічного префікса. Корисна довжина символу (T_u) – це величина, обернена до інтервалу між піднесучими. Тоді, довжина CP дорівнює ($T_g = G \cdot T_u$), де G – це відношення часу CP до корисного часу. Вибір G здійснюється відповідно до параметрів каналу. Загальна довжина символу OFDM складається з корисної довжини символу і довжини CP. Кількість піднесучих складається як з пілотного сигналу, так і з сигналів носіїв даних. Розмір FFT може варіюватися від 64, 128, 256, 512 та інші варіації. Тривалість символу OFDM-сигналу – це зворотний інтервал між піднесучими. Інтервал між піднесучими: $spc = 1/T_s$, T_s – час символу [9].

У блоці оцінювання параметрів OFDM у GNUradio було використано деякі алгоритми для реалізації оцінювання деяких параметрів OFDM. Далі наведено необхідні етапи, які було зроблено для реалізації цих алгоритмів.

Таблиця 2

Параметри, які дослідники використовують як ознаки для класифікації OFDM сигналу

Параметр	Значення
Кількість піднесучих даних	48
Кількість пілотних піднесучих	4
Інтервал між піднесучими	156.2 кГц
Займана смуга частот	8.28125 МГц
Тривалість короткої тренувальної послідовності	16 мкс
Тривалість довгої тренувальної послідовності	16 мкс
Захисний інтервал тренувальної послідовності	3.2 мкс
Тривалість преамбули PLCP	32 мкс
Тривалість захисного інтервалу	1.6 мкс
Тривалість символу POFDM	8 мкс

1. Обчислення автокореляційної функції вхідного вектора для оцінки довжини піднесучих (FFT) за допомогою дискретної автокореляційної функції.

2. Обчислення ЦАФ (циклічної автокореляційнї функції). Найпростіший спосіб обчислити ЦАФ полягає в тому, що вона є коефіцієнтом у розкладенні в ряд Фур'є автокореляції, що змінюється в часі, циклостаціонарного випадкового процесу (циклостаціонарного сигналу. Обчислення функції циклічної кореляції, що змінюється в часі, для знаходження довжини циклічного префікса.

3. Визначення інтервалу між піднесучими обчислюється наступним чином: sub-spc = (samplerate/FFTlength) та символьний час symtime = (1/subspc).

Також для оцінки параметрів сигналу було використано модуль GNU Radio під назвою Gr-inspector.

У Gr-inspector було додано модуль, який реалізує оцінку параметрів у GNU Radio Companion. Цей модуль GNU Radio розроблено спеціально для того, щоб реалізувати можливості аналізу сигналів у типовій блоковій структурі. Модуль здатний виконувати наступні функції:

– енергетичне детектування неперервних сигналів;
– фільтрація виявлених сигналів;
– оцінка параметрів OFDM (інтервал між несучими, час символу);
– сліпа OFDM синхронізація;
– передискретизація сигналів до постійної частоти;
– 3D візуалізація даних FAM, з gr-specest;
– використання моделей TensorFlow для AMC [10].

Для вирішення поставленої задачі одним із головних елементів є блок оцінки параметрів OFDM, який виконує оцінку чотирьох параметрів OFDM і виводить їх у вигляді повідомлень (інтервал між несучими, час символу, розмір FFT, тривалість символу). Об'єднавши цей блок з реалізацією енергетичного детектора і використавши вихідні дані обох блоків, отримаємо набір ознак для виявлення та класифікації БПЛА.

Далі за допомогою отриманого набору ознак направивши їх на блок машинного навчання представленого на рисуноку 3 буде здійснюватися навчання різних моделей та подальша класифікація сигналу.

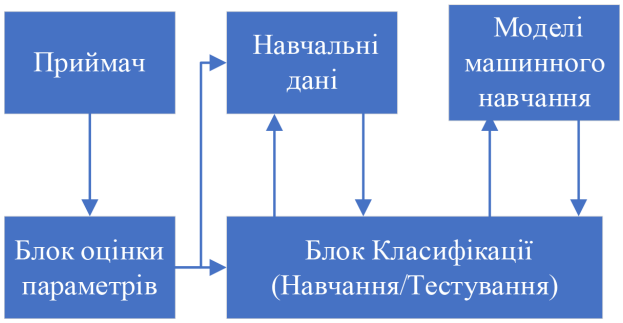


Рис. 3. Блок-схема детектора енергії на GNU Radio

Оцінені параметри спочатку використовуються для побудови навчальних даних і зберігаються в бібліотеці даних для подальшої обробки. Класифікатор в режимі навчання створює моделі на основі обраного алгоритму класифікації машинного навчання. Потім проводиться тестування нового сигналу за допомогою обраної моделі з бібліотеки даних.

Для експерименту було розроблено налаштований тестовий блок машинного навчання, виявлення енергії та блок оцінки параметрів для виявлення та класифікації сигналів дронів за допомогою GNU Radio та обладнання

HackRF. Необроблені дані радіочастотного сигналу будуть зібрані після реалізації та підключення всіх блоків. Для того, щоб провести експеримент і зібрати дані з модуля виявлення, необхідно вміти визначити і точно знати частоту передачі дрона. Таким чином можливо контролювати спектр і збирати дані для навчання, а потім тестувати класифікацію за допомогою спеціального блоку тестування машинного навчання. Для експерименту було зібрано дані для різних сценаріїв, які будуть використані як основа класифікації.

Підчас експерименту було використано дві моделі дронів фірми DJI.

Перший випадок – це коли єдиним сигналом, що передається є сигнал від DJI phantom; другий випадок – це коли єдиним сигналом, що передається є сигнал від Mavic. У налаштуваннях дрона режим передачі DJI phantom і Mavic RF було змінено з Auto на Custom. Спеціальне налаштування дозволяє користувачеві вибрати конкретну частоту, на якій буде передавати дрон. Це спрощує налаштування та моніторинг частотного спектру GNU Radio під час тестування. Щоб збирати дані з блоку виявлення, повинні мати можливість передавати на певній частоті, контролювати та збирати дані для навчання, а потім тестувати класифікацію за допомогою спеціального блоку тестування машинного навчання представленого на рисунку 3. Для цього експерименту дрон передає на каналі 13, а модуль приймача на GNU Radio центрується на частоті 2,411 ГГц, щоб виявити наявність активності на каналі.

В якості класифікатора нами було обрано метод K-найближчий сусідів. Алгоритми K-найближчих сусідів є одними з найпростіших алгоритмів машинного навчання. Ідея полягає в запам'ятовуванні навчальної множини, а потім у прогнозуванні мітки будь-якого нового екземпляра на основі міток його найближчих сусідів у навчальній множині. Обґрунтування такого методу базується на припущенні, що ознаки, які використовуються для опису точок домену, мають відношення до їхніх міток таким чином, що сусідні точки з великою ймовірністю матимуть однакові мітки. Крім того, в деяких ситуаціях, навіть коли навчальна множина величезна, пошук найближчого сусіда може бути виконаний надзвичайно швидко. K в k-найближчому сусіді – це кількість точок даних, найближчих до нового екземпляра. Наприклад, якщо $k = 2$, то алгоритм вибере найближчі два екземпляри або якщо $k = 5$, то алгоритм вибере найближчі п'ять сусідніх екземплярів і на їх основі класифікує їх відповідним чином.

Для нашого експерименту будемо використовувати метод керованої класифікації машинного навчання для навчання моделей, які будуть використовуватися для виявлення та класифікації, а дані, що використовуються для класифікації, будуть позначені відповідним чином. Навчальні дані містять параметри, які будуть використовуватися для класифікації, і для кожного об'єкта, що підлягає класифікації, збирається однакова кількість даних. Для першого тесту керованого навчання було зібрано 200 вибірок, коли DJI phantom був увімкнений, і 200 вибірок, коли Mavic був увімкнений. Обидві вибірки були позначені, щоб створити клас для класифікації. Загальна вибірка, використана для тренувальних даних, становить 400 значень. Для початку було вирішено почати з менших навчальних вибірок, а пізніше збільшити кількість вибірок, що використовуються для навчання. Для другого тесту загальна кількість вибірок, використаних для навчання, становила 3000; 1500 для сигналів Mavic і ще 1500 для сигналів DJI phantom.

В таблиці 3 наведено приклад зібраних даних.

На основі даних, використаних для нав-чання та тестування, нижче наведено мет-рику ефективності класифікації в Python після того, як навчальні дані були розділе-ні на навчальні та тестові для перевірки.

На рисунку 4 представлено діаграму, що складається з метрики ефективності, згенерованої в Python з використанням KNN-класифікатора для навчання вибірки даних.

Таблиця 3

Параметри, які дослідники використовують як ознаки для класифікації OFDM сигналу

Subcarrier-Spacing	Symbol-time	fft-length	cp-length	Signal-Power	Detection	class
97.65625	0.01024	1024	32	463.655823	1	Mavic
390.625	0.00256	256	32	466.324219	1	Mavic
97.65625	0.01024	1024	32	462.016113	1	Mavic
195.3125	0.00512	512	32	470.765259	1	Mavic
97.65625	0.01024	1024	32	470.765259	1	Mavic
1562.5	0.00064	64	32	452.020081	1	Phantom
195.3125	0.00512	512	32	452.105621	1	Phantom
1562.5	0.00064	64	16	450.157654	1	Phantom
390.625	0.00256	256	16	450.232574	1	Phantom
390.625	0.00256	256	32	265.731476	1	Phantom

Для класифікатора було використано KNN після порівняння точності різних класифікаторів, таких як дерево рішень, лінійна регресія та машина опорних векторів.

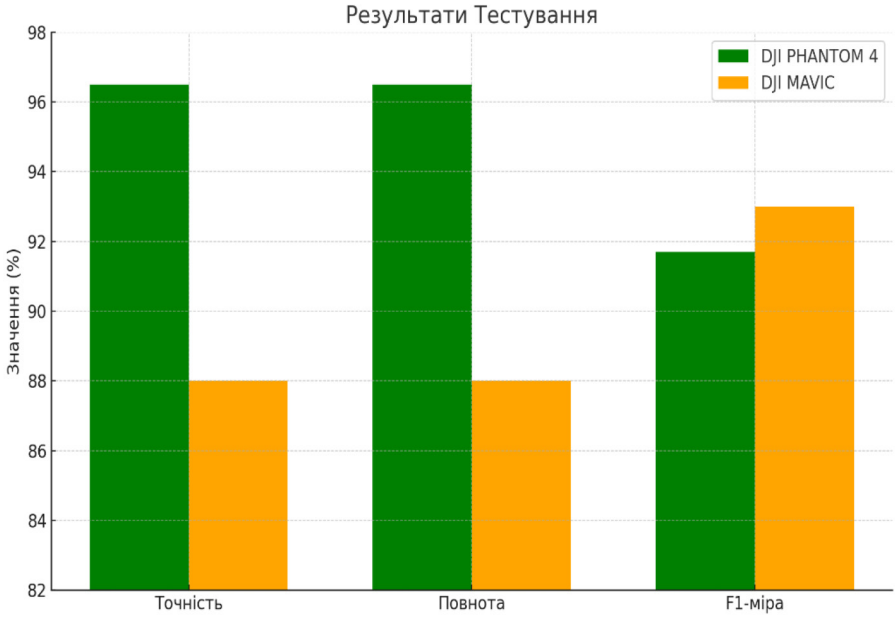


Рис. 4. Результати роботи класифікатора

Висновки

На основі проведеного експерименту та отриманих результатів можна зробити висновок про ефективність застосування методів машинного навчання для класифікації сигналів, що передаються з дронів DJI Phantom та Mavic. Ретельний аналіз параметрів сигналу, таких як Subcarrier-Spacing, Symbol-time, fft-length, cp-length та Signal-Power, дозволив сформувати інформативний набір ознак, які були використані для побудови моделей класифікації.

Серед протестованих алгоритмів машинного навчання, найкращі результати продемонстрував метод K-найближчих сусідів (KNN), який забезпечив найвищі показники точності, повноти та F1-міри для обох класів дронів. Це свідчить про те, що KNN добре справляється з розпізнаванням навіть при мінімальних відмінностях у параметрах сигналів, що є характерним для пристроїв одного виробника.

Однак, попри високу якість класифікації, залишається простір для вдосконалення. Подальші дослідження будуть спрямовані на підвищення точності моделі, зокрема шляхом виявлення нових інформативних ознак на основі тестової статистики та аналізу вхідних сигналів. Це дозволить створити більш надійну систему розпізнавання, що може бути використана в реальних умовах, зокрема в системах безпеки, моніторингу повітряного простору або при виявленні несанкціонованих БПЛА.

Загалом, проведена робота демонструє потенціал інтеграції сучасних підходів машинного навчання в задачі класифікації сигналів від дронів, що відкриває нові перспективи у сфері радіомоніторингу та безпілотних технологій.

Список використаної літератури

1. J. McCoy, A. Rawal, D. B. Rawat and B. M. Sadler, “Ensemble Deep Learning for Sustainable Multimodal UAV Classification”, in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 24, no. 12, pp. 15425–15434, Dec. 2023, doi: 10.1109/TITS.2022.3170643

2. Mo Y, Huang J, Qian G. Deep Learning Approach to UAV Detection and Classification by Using Compressively Sensed RF Signal. Sensors. 2022; 22(8):3072. https://doi.org/10.3390/s22083072

3. Y. Wang, Z. Chu, I. Ku, E. C. Smith and E. T. Matson, “A Large-Scale UAV Audio Dataset and Audio-Based UAV Classification Using CNN”, *2022 Sixth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, Italy, 2022, pp. 186–189, doi: 10.1109/IRC55401.2022.00039

4. Ezuma, Martins, et al. “Comparative analysis of radar cross section based UAV classification techniques”. arXiv preprint arXiv:2112.09774 (2021). https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.09774

5. X. Chen, C. Ma, C. Zhao and Y. Luo, “UAV Classification Based on Deep Learning Fusion of Multidimensional UAV Micro-Doppler Image Features”, in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 21, pp. 1–5, 2024, Art no. 3503205, doi: 10.1109/LGRS.2024.3371171

6. Shayea, I.; Dushi, P.; Banafaa, M.; Rashid, R. A.; Ali, S.; Sarijari, M. A.; Daradkeh, Y. I.; Mohamad, H. Handover Management for Drones in Future Mobile Networks – A Survey. *Sensors* 2022, *22*, 6424. https://doi.org/10.3390/s22176424

7. Del Barrio, Alberto A., et al. “HackRF+ GNU Radio: A software-defined radio to teach communication theory”. *The International Journal of Electrical Engineering & Education* 60.1 (2023): 23–40. https://doi.org/10.1177/0020720919868144

8. C. Liu, C. Guo, Y. Yang, W. Ni and T. Q. S. Quek, “OFDM-Based Digital Semantic Communication With Importance Awareness”, in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 72, no. 10, pp. 6301–6315, Oct. 2024, doi: 10.1109/TCOMM.2024.3397862

9. Amar Al-Jzari, Kostanic Iviva, Cyclic Prefix Length Determination for Orthogonal Frequency Division Multiplexing System over Different Wireless Channel Models Based on the Maximum Excess Delay Spread, American Journal of Engineering and Applied Sciences 8 (2015), https://doi.org/10.3844/ajeassp.2015.82.93

10. GNU Radio. gr-inspector [Електронний ресурс] / GitHub. – Режим доступу: https://github.com/gnuradio/gr-inspector

УДК 004.94+519.2 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.28

Д. О. МОСКАЛИК
аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID: 0000-0002-4421-9325

Д. С. АНТОНЮК
кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри інженерії програмного забезпечення
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID: 0000-0001-7496-3553

МОДЕЛЮВАННЯ ЗВ'ЯЗНОСТІ ШЛЯХОМ ІМОВІРНІСНОГО РОЗПОДІЛУ ЧАСТОТ ВНЕСЕННЯ ЗМІН ДО ПРОГРАМНИХ МОДУЛІВ ПРИ СИМУЛЯЦІЇ ПРОЦЕСУ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

В сучасному світі продуктивність розробки програмних систем не враховується на етапі планування при виборі типу архітектури майбутнього програмного проєкту через недостатньо точний та занадто складний процес оцінки необхідних затрат часу та ресурсів на побудову такої програмної системи. Для забезпечення можливості дослідження впливу різних типів архітектури програмних систем на продуктивність їх розробки шляхом симуляції відповідних процесів розробки програмного забезпечення, в даній роботі досліджується підхід до моделювання зв'язності між модулями програмної системи на основі аналізу історії внесення змін до 8 модульних монолітних та мікросервісних проєктів з відкритим вихідним кодом. В результаті дослідження модульної структури та історії змін вихідного коду виявлено наявність логнормального імовірнісного розподілу як розміру програмних модулів, так і частоти їх модифікації, характер залежності між якими є лінійним, але параметри кореляції відрізняються між різними проєктами. Аналіз зв'язності модулів на основі видобування правил асоціації з історії їх незалежних та одночасних змін виявив степеневу функцію залежності середніх значень як вхідної, так і вихідної зв'язності від частоти зміни модуля, але параметри такої залежності також різні для різних проєктів та корелюються із кількістю модулів. З метою оптимізації обчислень при симуляції процесу розробки програмного забезпечення було запропоновано використання незалежних частот зміни модулів замість детального моделювання зв'язності кожної окремої їх пари, для чого було досліджено параметри логнормального розподілу незалежних імовірностей зміни модулів для кожного проєкту та за допомогою лінійної регресії виведено коефіцієнти залежності параметрів такого розподілу від кількості модулів в програмній системі, що моделюється. Для підвищення обчислювальної ефективності симуляцій було додатково запропоновано алгоритм коригування згенерованих частот зміни модулів для збільшення імовірності внесення змін хоча б в один модуль на кожній ітерації симуляції, оскільки всі імовірності зміни модулів незалежні та існує ненульова імовірність невнесення змін в жоден модуль.

Ключові слова: *моделювання, симуляція, модульність, еволюційна зв'язність, розробка програмного забезпечення, логнормальний розподіл, алгоритм.*

D. O. MOSKALYK
Postgraduate Student at the Department of Software Engineering
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID: 0000-0002-4421-9325

D. S. ANTONIUK
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Software Engineering
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID: 0000-0001-7496-3553

SOFTWARE MODULES COUPLING MODELLING IN SOFTWARE DEVELOPMENT PROCESS SIMULATIONS USING PROBABALISTIC DISTRIBUTION OF MODULE CHANGE FREQUENCIES

In today's world, the software development productivity is not considered at the planning stage when choosing the architecture type for a future software project due to an inaccurate and overly complex process of estimating the necessary time and resources needed to build such a system. To enable research on the impact of different types of software architectures on productivity through simulation of corresponding software development processes, this study examines

the approach to modeling the coupling between modules of a software system based on an analysis of the change history of 8 modular monolithic and microservice open-source projects. As a result of studying the modular structure and change history of the source code, it was found that there is a lognormal probability distribution both for the size of the software modules and their modification frequency, with linear dependence between them but different correlation parameters for different projects. The analysis of modules coupling based on the association rules mining from the history of their independent and simultaneous changes revealed a power function as the relationship between average values of both input and output coupling and the module change frequency, but the parameters of such a relationship also differed for different projects and were found to correlate with the number of modules in the software system being modeled. To optimize calculations during the simulation of the software development process, it was proposed to use independent module change frequencies instead of detailed modeling of each pair's coupling, which involved investigating the parameters of the lognormal distribution of independent module change probabilities for each project and using linear regression to derive the coefficients of the dependence of the parameters of such a distribution on the number of modules in the software system. To further enhance computational efficiency of simulations, an algorithm for adjusting the generated module change frequencies was additionally proposed to increase the probability of at least one module modification being made at each iteration of simulation, as all change probabilities are independent and there is a non-zero chance of not making any changes to any module.

Key words: *modeling, simulation, modularity, evolutionary coupling, software development, lognormal distribution, algorithm.*

Постановка проблеми

В сучасному світі існують декілька найбільш поширених типів архітектури серверних програмних систем, що визначають правила організації вихідного коду, такі як багатошарова монолітна, модульна монолітна, а також сервісно-орієнтована та мікросервісна архітектури. При плануванні майбутньої програмної системи та виборі відповідної архітектурної моделі, на додачу до необхідності підтримки всіх обов'язкових функціональних вимог, мають також бути враховані багато різних нефункціональних факторів, таких як безпека, швидкодія, надійність, масштабованість та інші. В той же час, продуктивність процесу розробки такої системи не впливає на сам вибір архітектурної моделі, а враховується лише як наслідок такого вибору для розрахунку термінів та вартості створення даного програмного продукту. Причиною такої поведінки може бути недостатньо точний та занадто складний процес оцінки необхідних затрат часу та ресурсів на побудову запланованої програмної системи. Крім того, для врахування вартості розробки системи при виборі архітектурної моделі, оцінка необхідних затрат має бути розрахована для декількох різних архітектурних рішень, що робить сам процес такої оцінки ще більш складним та вартісним.

Можливим рішенням для врахування продуктивності процесу розробки на етапі вибору типу архітектури може стати наявність відносних порівняльних характеристик продуктивності розробки для різних архітектурних моделей.

Одним з шляхів дослідження таких порівняльних характеристик є історичний досвід побудови програмних систем одразу в декількох різних архітектурних моделях, проте такий підхід має ряд недоліків. Якщо одна і та ж програмна система буде побудована одними і тими ж розробниками спочатку в одній архітектурі, а потім в іншій, то продуктивність розробки останньої буде вища за об'єктивну через вже наявний досвід створення першої. Якщо ж та сама програмна система в різних архітектурних моделях буде створюватись паралельно різними командами розробки, то на результуючу продуктивність будуть мати вплив як професійні якості та досвід індивідуальних розробників, так і їх синергія в командній роботі. В обох випадках складно буде оцінити об'єктивність отриманих результатів через велику кількість невідомих змінних, а також варто враховувати високу вартість експериментів такого роду.

Іншим варіантом дослідження порівняльних характеристик продуктивності процесу розробки в контексті різних типів архітектури є визначення відмінностей між різними архітектурними моделями, що мають вплив на продуктивність розробки, та проведення низькорівневих симуляцій процесів розробки за допомогою дискретно-подійного та агентно-орієнтованого моделювання з врахуванням таких відмінностей.

Зв'язок модульності з різними метриками процесу розробки програмного забезпечення був досліджений ще декілька десятиліть тому, де було виявлено позитивний вплив модульної організації коду, слабкої зв'язності назовні та сильного зчеплення всередині модулів на продуктивність розробки, надійність програмної системи та зменшення вартості її подальшого обслуговування. Тому є доцільним моделювання модульної організації коду в низькорівневих симуляціях процесу розробки програмного забезпечення для врахування даного впливу на продуктивність розробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Моделювання як метод дослідження різноманітних процесів реального світу широко використовується як в науковій, так і в комерційній сферах. В працях Т. Шматковської, Т. Коробчук [1, с. 157], а також А. Сараванос (Saravanos, A.), М. Курінґа (Curinga, M. X.) [2, с. 15] досліджується важливість ролі моделювання бізнес-процесів підприємств, що дозволяє знаходити шляхи для покращення поточних процесів та впровадження інновацій.

Дослідженням процесу розробки програмного забезпечення шляхом його моделювання займались такі вітчизняні науковці, як Ю. С. Кордунова, М. Фелтіновскі, О. В. Придатко, О. О. Смотр [3, с. 29], С. Б. Приходько, Н. В. Приходько, К. О. Книрік [4, с. 50], а також іноземні дослідники, такі як А. Сараванос (Saravanos, A.), М. Курінґа (Curinga, M. X.) [2, с. 15]. В даних працях процеси розробки програмних систем моделюються на рівні етапів життєвого циклу програмного проєкту та не враховують вплив низькорівневих архітектурних факторів на продуктивність розробки. При аналізі останніх наукових робіт щодо моделювання процесу розробки програмного забезпечення, Дж. Гарсія, Дж. Енрікес та інші виявили спад частоти застосування парадигми системної динаміки, високу популярність дискретно-подійного та агентно-орієнтованого модулювання, а також тенденцію до зростання їх популярності [5, с. 16].

Незважаючи на те, що факт позитивного впливу модульності на продуктивність розробки вже давно відомий, проблема вимірювання та моніторингу зв'язності мікросервісів [6, с. 6; 7, с. 15] та питання оптимальної модульності [8, с. 32728] все ще активно вивчається науковцями різних країн. Враховуючи комплексну природу взаємозалежностей різних компонентів програмної системи, що було детально висвітлено в праці «Demystifying dependence» Дж. Коппела та Д. Джексона [9, с. 49], є доцільним визначення параметрів модульності шляхом дослідження еволюційної зв'язності модулів на основі історії внесення змін до вихідного коду існуючих модульних програмних систем. Даний підхід також широко використовується для передбачення майбутніх змін коду в пов'язаних модулях, як, наприклад, в працях Т. Рольфснес, С. Ді Алезіо та інші [10, с. 202] і М. Мондал, Б. Рой на інші [11, с. 241].

Формулювання мети дослідження

Метою статті є дослідження алгоритму моделювання зв'язності між програмними модулями для низькорівневої симуляції процесу розробки програмного забезпечення на основі аналізу історії внесення змін до модульних монолітних та мікросервісних проєктів з відкритим вихідним кодом.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для дослідження параметрів модульності були обрані 8 мікросервісних та модульних монолітних програмних проєктів з відкритим вихідним кодом на платформі GitHub. Загальна інформація про обрані проєкти відображена в таблиці 1. Кожен проєкт містить вихідний код на різних мовах програмування, включаючи клієнтський код для імплементації інтерфейсу користувача, проте для дослідження параметрів модульності саме серверних типів архітектури були проаналізовані лише ті частини вихідного коду, що організовані в модулі та представлені серверними мовами програмування. Довжина історії змін, кількість файлів та кількість рядків коду були відповідно відфільтровані та відображають лише характеристики модульних серверних частин коду, а також не включають в себе код автоматизованих тестів.

Таблиця 1

Модульні проєкти для аналізу

Назва проєкту	Код проєкту	Мова	Архітектура	К-ть модулів	К-ть змін	К-ть файлів	К-ть рядків коду
OrchardCore	https://bit.ly/45nFvFI	C#	монолітна	116	4457	4702	183 748
magento2	https://bit.ly/4k7pGaL	PHP	монолітна	220	79 454	15 543	1 120 353
ftgo-application	https://bit.ly/4dvKpml	Java, Groovy	мікросервісна	23	130	315	9004
SimplCommerce	https://bit.ly/3Sk10zB	C#	монолітна	43	509	730	27 560
Modular-monolith-by-example	https://bit.ly/4mAtyD2	C#	монолітна	11	185	754	14 534
dotnet-starter-kit	https://bit.ly/43tDMMt	C#	монолітна	25	23	288	6706
eShopOnContainers	https://bit.ly/45r4fNo	C#	мікросервісна	8	879	434	23 672
eShop	https://bit.ly/43etC3F	C#	мікросервісна	21	114	491	17 603

Так як компілятор мови C# не підтримує циклічних залежностей між окремими проєктами вихідного коду, загальновідомим шляхом вирішення таких технічних обмежень є розділення певного модуля на два окремих проєкта різного рівня абстракції. Так, більшість бібліотек фреймворку ASP.NET представлені двома пакетами: один містить лише абстракції, а інший код імплементації. Такий самий підхід використовується і в більшості кінцевих модульних проєктів, як, наприклад, в проєкті OrchardCore один окремий модуль може бути представлений двома проєктами вихідного коду, один з яких містить в своїй назві додатковий суфікс «.Core» після назви модуля. В інших проєктах також можуть використовуватись суфікси «.Abstractions» або «.Contracts». При аналізі вихідного коду в даному дослідженні такі проєкти сприймаються як складові частини відповідних модулів, а не як окремі модулі.

Як видно з таблиці 1, найбільша кількість модулів присутня в проєктах «OrchardCore» та «magento2», тому самі ці 2 проєкти доцільно проаналізувати на предмет функції розподілу розміру модулів. Гістограми розподілу розміру

модулів для обох проєктів з лінійною та логарифмічною шкалою наведені на рисунку 1. Для кращого сприйняття інформації, розмір модулів виражається у відсотках від загального об'єму модульного коду відповідного проєкту.

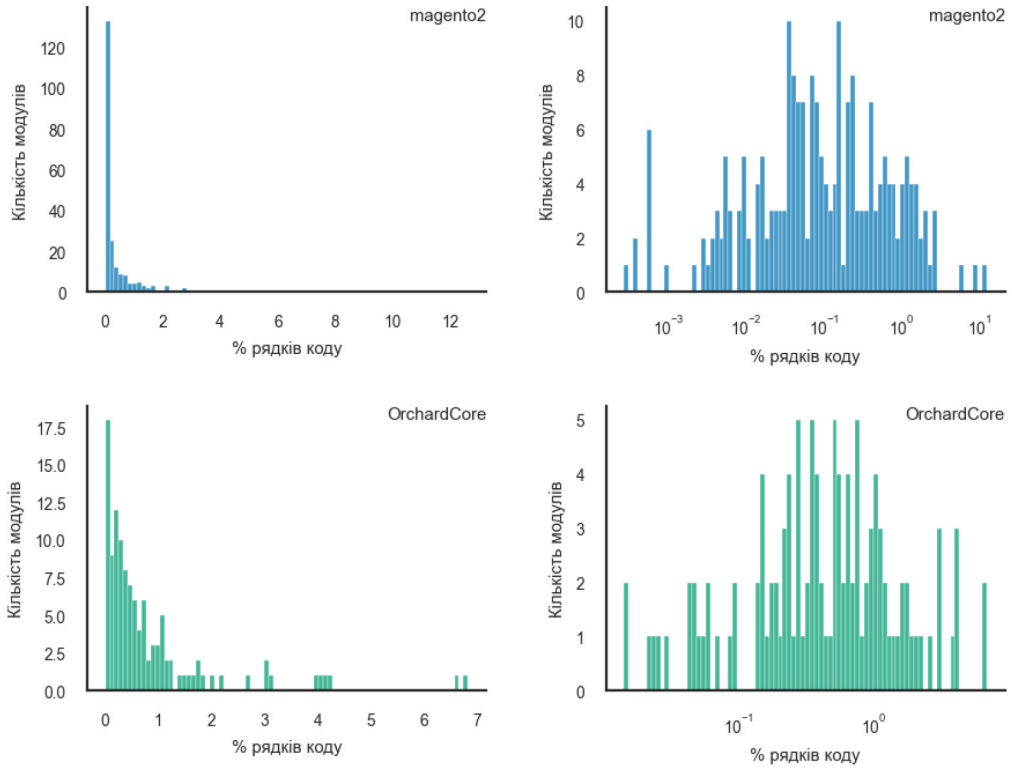


Рис. 1. Розподіл розміру модулів для проєктів «OrchardCore» та «magento2»

Так як гістограми з логарифмічною шкалою мають форму нормального розподілу, то реальний розподіл розмірів модулів даних програмних систем підпорядковується логнормальному розподілу, але з різними параметрами для різних проєктів.

Таким самим чином можна проаналізувати розподіл частот зміни різних модулів та дослідити зв'язок розміру модулів від частоти їх зміни. Частота зміни модуля може бути розрахована за допомогою формули 1, що також буде відповідати незалежній імовірності зміни модуля в кожній окремій транзакції модифікації вихідного коду системи.

$$change_frequency(A) = \frac{count(A)}{N}, \tag{1}$$

де $count(A)$ – кількість транзакцій модифікації коду, в яких вносяться зміни до модуля А, N – загальна кількість транзакцій.

Залежність частоти внесення змін в модуль від його розміру зображена на рисунку 2 у вигляді діаграми розсіювання. З даної діаграми можна зробити висновок, що залежність між розміром модуля та частотою його зміни є прямою та має лінійний характер, тобто більші за розміром модулі змінюються частіше. Також варто підкреслити, що дана кореляція притаманна як монолітній архітектурі, так і мікросервісній.

Наступним кроком є дослідження зв'язності модулів на основі історії транзакцій внесення змін до них. Це можливо зробити шляхом виявлення правил асоціації між модулями, що ґрунтується на аналізі частот зміни кожної пари модулів як окремо один від іншого, так і одночасно в рамках однієї транзакції. В методах передбачення майбутніх змін використовуються обидва параметри метрики: «support» (підтримка) та «confidence» (довіра), що розраховуються за формулами 2 та 3 [10, с. 202], проте для моделювання зв'язності достатньо буде розрахувати лише «confidence».

$$support(A \to B) = \frac{count(A \cup B)}{N}, \tag{2}$$

де count($A \cup B$) – кількість транзакцій зміни коду, в яких одночасно модифікуються модулі A і B, N – загальна кількість транзакцій.

$$confidence(A \to B) = \frac{count(A \cup B)}{count(A)}, \tag{3}$$

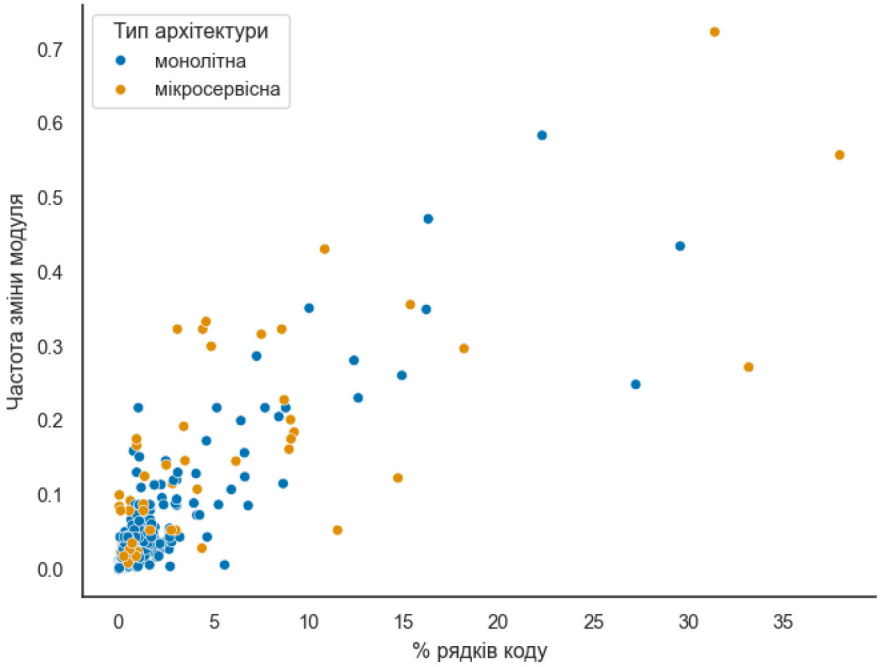


Рис. 2. Залежність частоти зміни модуля від його розміру

де $count(A \cup B)$ – кількість транзакцій зміни коду, в яких одночасно модифікуються модулі A і B, $count(A)$ – загальна кількість транзакцій, в яких змінюється модуль A.

Розраховані значення $confidence(A \rightarrow B)$ виражають вихідну зв'язність модуля A по відношенню до модуля B, або імовірність зміни модуля B при модифікації модуля A, та симетрично вхідну зв'язність модуля B по відношенню до модуля A. Для дослідження взаємозв'язку між зв'язністю модулів та їх незалежною імовірністю зміни доцільно розрахувати середні значення вихідної та вхідної зв'язності для кожного модуля та порівняти їх з частотами зміни модулів. На рисунку 3 зображені діаграми залежності середніх значень вхідної та вихідної зв'язності всіх модулів з частотою їх зміни. Дані різних проєктів зображені різними кольорами.

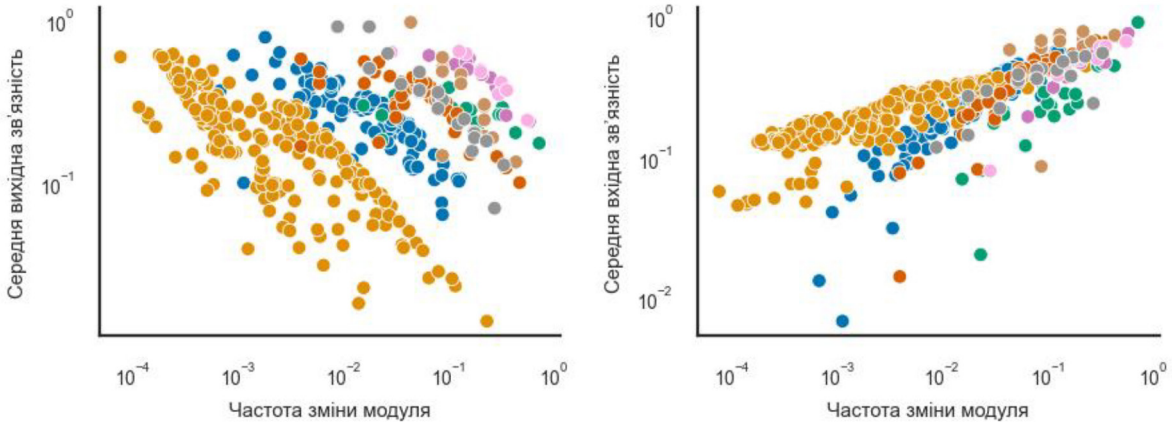


Рис. 3. Кореляція частоти зміни модулів та їх середніх значень вхідної та вихідної зв'язності

Логарифмічні шкали на діаграмах розкривають наявність степеневої функції залежності зв'язності модулів від частоти їх зміни, але параметри такої залежності різні для різних проєктів. Як видно з діаграм на рисунку 3, чим більша частота зміни коду модуля, а відповідно і його розмір, тим менша імовірність внесення змін в інші модулі та тим більша імовірність зміни такого модуля при модифікації інших модулів.

Теоретично, для моделювання зв'язності модулів в дискретно-подійних та агентно-орієнтованих симуляціях можна на кожній ітерації внесення змін до коду обирати перший модуль та, комбінуючи параметри вхідної та вихідної зв'язності, симулювати зміни в пов'язаних модулях, але у даного підходу є декілька проблем. Розраховані раніше незалежні імовірності зміни окремих модулів вже включають в себе як вхідну, так і вихідну зв'язаність з іншими модулями, впливаючи на розраховані імовірності зміни один одного, тому дані імовірності не можна використовувати

для вибору першого модуля для модифікації в певній транзакції внесення змін до вихідного коду системи. Крім того, моделювання як різної кількості модулів, так і зв'язності між кожною їх парою може бути обчислювально неефективним та сповільнювати виконання симуляцій. Також варто зауважити, що середня кількість зв'язаних модулів по всіх проєктах складає приблизно 96 % від загальної кількості модулів у відповідній системі.

Враховуючи наведені обмеження та отримані дані, альтернативним підходом до моделювання зв'язності може бути використання незалежних імовірностей внесення змін для визначення всіх модулів програмної системи, що підлягають модифікації на кожній ітерації симуляції. Як видно з рисунку 3, зв'язність модулів має степеневу залежність від частоти їх модифікації, але відрізняється від проєкта до проєкта. Так як імовірнісний розподіл розміру модулів має логнормальну форму, а частоти зміни модулів лінійно залежать від їх розміру, то закон розподілу частот модифікації модулів також має логнормальний характер. Враховуючи те, що чим менша кількість модулів в програмній системі, тим частіше кожен з них змінюється, є доцільним визначення параметрів логнормального розподілу частот модифікації модулів для кожного проєкту та дослідження їх взаємозв'язку з загальною кількістю модулів в кожному з них.

Для розрахунку коефіцієнтів логнормального розподілу частот зміни модулів окремо для кожного проєкту можна використати метод максимальної правдоподібності. На рисунку 4 зображені співвідношення отриманих коефіцієнтів розподілу відносно логарифмів кількості модулів у відповідному проєкті та їх екстраполяції, отримані шляхом лінійної регресії.

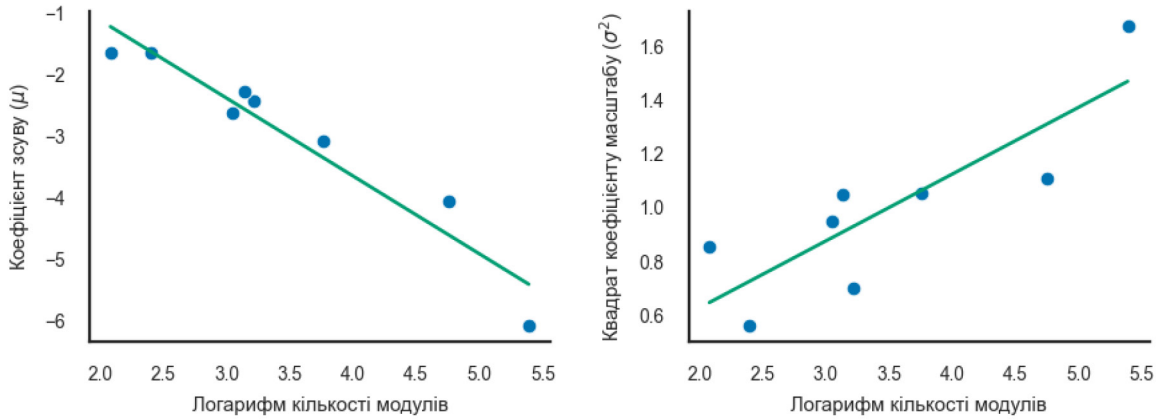


Рис. 4. Залежність параметрів логнормального розподілу частот зміни модулів від їх загальної кількості у відповідному проєкті

Згідно отриманих результатів, параметри логнормального розподілу частот зміни модулів від їх кількості при симуляції процесу розробки абстрактної програмної системи можуть бути розраховані за формулами 4 та 5.

$$\mu = -1.2624653134178174 \ln N + 1.407336741730882, \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{0.24806030790958875 \ln N + 0.13184253926824063}, \quad (5)$$

де N – загальна кількість модулів в проєкті.

На етапі підготовки до запуску симуляції процесу розробки, виходячи з необхідної кількості модулів, мають бути розраховані параметри розподілу частот їх зміни відповідно до формул 4 і 5 та відповідно до отриманого розподілу кожен модуль отримає своє значення незалежної імовірності модифікації на кожній ітерації симуляції. Так як логнормальний розподіл – неперервний, то існує ненульова імовірність генерації частоти зміни модуля, що буде більше 100 %, тому під час генерації випадкових значень варто відсіювати всі згенеровані значення, більші за обрану верхню межу. Максимальне значення імовірності зміни модуля серед всіх проаналізованих проєктів складає 72.3 %, що також може бути використано в якості такої верхньої межі.

Так як згенеровані імовірності модифікації модулів незалежні, то існує ненульова імовірність, що на певній ітерації симуляції жоден модуль не буде змінений. В такому випадку процес відбору модулів, що підлягають модифікації на поточній ітерації симуляції має бути повторений знову, поки хоча б один модуль не увійде в поточну транзакцію внесення змін до коду системи. Спираючись на розраховані частоти зміни модулів проєктів, що аналізуються, середнє значення імовірності невнесення змін в жоден модуль серед всіх проєктів складає 5.6 %, а максимальне значення досягає 13.4 %. Для оптимізації обчислень в симуляціях процесу розробки програмного забезпечення пропонується підхід до коригування згенерованих імовірностей модифікації модулів таким чином, щоб максимально знизити імовірність невнесення змін в жоден модуль в процесі симуляції, але тим часом не спотворити розподіл частот змін між модулями. Для цього необхідно розрахувати поточну імовірність невнесення

змін в жоден модуль за формулою 6, вирахувати коригуючий коефіцієнт за формулою 7 та перерахувати поточні імовірності модифікації всіх модулів за формулою 8.

$$Q = \prod_{i}^{N} (1 - p_i), \tag{6}$$

де N – загальна кількість згенерованих модулів, p_i – імовірність внесення змін в i-тий модуль, Q – поточна імовірність невнесення змін в жоден модуль.

$$K = \left(\frac{Q'}{Q} \right)^{\frac{1}{N}}, \tag{7}$$

де N – загальна кількість згенерованих модулів, Q – поточна імовірність невнесення змін в жоден модуль, $Q' > 0$ – бажана імовірність невнесення змін в жоден модуль, K – коригуючий коефіцієнт.

$$p_i' = 1 - K \cdot (1 - p_i), \tag{6}$$

де p_i – згенерована імовірність внесення змін в i-тий модуль, K – коригуючий коефіцієнт, p_i' – скоригована імовірність зміни i-го модуля.

Висновки

У даній роботі були проаналізовані 8 модульних проєктів з відкритим вихідним кодом, як в монолітній архітектурі, так і у мікросервісному виконанні. Всі проєкти різного розміру, містять різну кількість модулів та різну довжину історії змін. В результаті дослідження модульної структури та історії змін вихідного коду виявлено наявність логнормального імовірнісного розподілу як розміру програмних модулів, так і частоти їх модифікації, характер залежності між якими є лінійним, але параметри кореляції відрізняються між різними проєктами, що може бути зумовлено як різними мовами програмування, так і різною внутрішньою складністю коду модулів. Аналіз зв'язності модулів на основі видобування правил асоціації з історії їх незалежних та одночасних змін виявив степеневу функцію залежності середніх значень як вхідної, так і вихідної зв'язності від частоти зміни модуля, але параметри такої залежності також різні для різних проєктів та корелюються із кількістю модулів. З метою оптимізації обчислень при симуляції процесу розробки програмного забезпечення було запропоновано використання незалежних частот зміни модулів замість детального моделювання зв'язності кожної окремої їх пари. Для цього було досліджено параметри логнормального розподілу незалежних імовірностей зміни модулів для кожного проєкту та за допомогою лінійної регресії виведено коефіцієнти залежності параметрів такого розподілу від кількості модулів в програмній системі, що моделюється. Так як всі імовірності зміни модулів незалежні, то існує ненульова імовірність невнесення змін в жоден модуль в процесі симуляції, що впливає на її обчислювальну ефективність. Тому було додатково запропоновано алгоритм коригування згенерованих частот зміни модулів для збільшення імовірності внесення змін хоча б в один модуль на кожній ітерації симуляції. Даний підхід до моделювання зв'язності модулів може бути застосований в дискретно-подійних та агентно-орієнтових симуляціях процесу розробки програмного забезпечення для подальшого дослідження впливу модульності на продуктивність розробки. Також є доцільним дослідження еволюції модульної структури програмних систем, оскільки кількість, розмір та зв'язність модулів не є сталими в часі і також змінюються в процесі розробки таких систем.

Список використаної літератури

1. Шматковська Т., Коробчук Т. Сучасні інформаційні та комунікаційні технології в моделюванні бізнес-процесів. *Економічний форум*. 2023. № 1(3). С. 156–161. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2308-8559-2023-3-20

2. Saravanos, A., Curinga, M. X. Simulating the Software Development Lifecycle: The Waterfall Model. *Applied System Innovation*. 2023. Vol. 6. P. 108. DOI: https://doi.org/10.3390/asi6060108

3. Кордунова Ю. С., Фелтіновскі М., Придатко О. В., Смотр О. О. Математичне моделювання процесу розробки спеціалізованих програмних систем безпеко-орієнтованого спрямування. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2023. № 27, С. 23–31. DOI: https://doi.org/10.32447/20784643.27.2023.03

4. Приходько, С. Б., Приходько, Н. В., & Книрік, К. О. Математичне моделювання трудомісткості розробки мобільних застосунків у фазі планування із врахуванням викидів. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем*: матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції. м. Дніпро, 6–8 листопада 2019 р. / Український державний хіміко-технологічний університет. Дніпро. 2019. С. 50. https://udhtu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/08/cmoss_2019.pdf#page=50

5. J. A. García-García, J. G. Enríquez, M. Ruiz, C. Arévalo, A. Jiménez-Ramírez Software Process Simulation Modeling: Systematic literature review. *Computer Standards & Interfaces*. 2020. Vol. 70. P. 103425. DOI: https://doi.org/10.1016/j.csi.2020.103425

6. Panichella S., Rahman M. I., Taibi D. Structural Coupling for Microservices. *Proceedings of the 11th International Conference on Cloud Computing and Services Science*. 2021. Vol. 1. P. 280–287. DOI: https://doi.org/10.5220/0010481902800287

7. Apolinário D. R., de França B. B. A method for monitoring the coupling evolution of microservice-based architectures. *Journal of the Brazilian Computer Society*. 2021. Vol. 27(17). Article 17. DOI: https://doi.org/10.1186/s13173-021-00120-y

8. Vural H., Koyuncu M. Does Domain-Driven Design Lead to Finding the Optimal Modularity of a Microservice? *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 32721-32733. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060895

9. Koppel J., Jackson D. Demystifying dependence. *Proceedings of the 2020 ACM SIGPLAN International Symposium on New Ideas, New Paradigms, and Reflections on Programming and Software*. 2020. P. 48–64. DOI: https://doi.org/10.1145/3426428.3426916

10. Rolfsnes T. et al. Generalizing the Analysis of Evolutionary Coupling for Software Change Impact Analysis. *2016 IEEE 23rd International Conference on Software Analysis, Evolution, and Reengineering (SANER)*. 2016. P. 201–212. DOI: https://doi.org/10.1109/SANER.2016.101

11. Mondal M. et al. Historank: History-based ranking of co-change candidates. *2020 IEEE 27th International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering (SANER)*. 2020. P. 240–250. DOI: https://doi.org/10.1109/SANER48275.2020.9054869

References

1. Shmatkovska, T., & Korobchuk, T. (2023). Suchasni informatsiini ta komunikatsiini tekhnolohii v modeliuvanni biznes-protsesiv [Modern information and communication technologies in business process modeling]. *Ekonomichnyi forum*, *1*(3), 156–161. https://doi.org/10.36910/6775-2308-8559-2023-3-20 [in Ukrainian]

2. Saravanos, A., & Curinga, M. X. (2023). Simulating the Software Development Lifecycle: The Waterfall Model. *Applied System Innovation*, *6*(6), 108. https://doi.org/10.3390/asi6060108

3. Kordunova Yu. S., Feltinovski M., Prydatko O. V., & Smotr O. O. (2023). Matematychne modeliuvannia protsesu rozrobky spetsializovanykh prohramnykh system bezpeko-oriientovanoho spriamuvannia [Mathematical modeling of the development process of specialized security-oriented software systems]. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiediialnosti*, *27*, 23–31. https://doi.org/10.32447/20784643.27.2023.03 [in Ukrainian]

4. Prykhodko, S. B., Prykhodko, N. V., & Knyrik, K. O. (2019). Matematychne modeliuvannia trudomistkosti rozrobky mobilnykh zastosunkiv u fazi planuvannia iz vrakhuvanniam vykydiv [Mathematical modeling of the labor intensity of mobile application development in the planning phase, taking into account emissions]. In *Kompiuterne modeliuvannia ta optymizatsiia skladnykh system: materialy V Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii*, 6–8 lystopada 2019 roku (p. 50). Dnipro: Ukrainskyi derzhavnyi khimiko-tekhnolohichnyi universytet. https://udhtu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/08/cmoss_2019.pdf#page=50 [in Ukrainian]

5. García-García, J. A., Enríquez, J. G., Ruiz, M., Arévalo, C., & Jiménez-Ramírez, A. (2020). Software Process Simulation Modeling: Systematic literature review. *Computer Standards & Interfaces*, *70*, 103425. https://doi.org/10.1016/j.csi.2020.103425

6. Panichella, S., Rahman, M., & Taibi, D. (2021). Structural Coupling for Microservices. In *Proceedings of the 11th International Conference on Cloud Computing and Services Science* (pp. 280–287). SCITEPRESS – Science and Technology Publications. https://doi.org/10.5220/0010481902800287

7. Apolinário, D. R. F., & de França, B. B. N. (2021). A method for monitoring the coupling evolution of microservice-based architectures. *Journal of the Brazilian Computer Society*, *27*(1), Article 17. https://doi.org/10.1186/s13173-021-00120-y

8. Vural, H., & Koyuncu, M. (2021). Does Domain-Driven Design Lead to Finding the Optimal Modularity of a Microservice? *IEEE Access*, *9*, 32721–32733. https://doi.org/10.1109/access.2021.3060895

9. Koppel, J., & Jackson, D. (2020). Demystifying dependence. In *Proceedings of the 2020 ACM SIGPLAN International Symposium on New Ideas, New Paradigms, and Reflections on Programming and Software* (pp. 48–64). SPLASH '20: Conference on Systems, Programming, Languages, and Applications, Software for Humanity. ACM. https://doi.org/10.1145/3426428.3426916

10. Rolfsnes, T., Di Alesio, S., Behjati, R., Moonen, L., & Binkley, D. W. (2016). Generalizing the Analysis of Evolutionary Coupling for Software Change Impact Analysis. In *2016 IEEE 23rd International Conference on Software Analysis, Evolution, and Reengineering (SANER)* (pp. 201–212). 2016 IEEE 23rd International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering (SANER). IEEE. https://doi.org/10.1109/saner.2016.101

11. Mondal, M., Roy, B., Roy, C. K., & Schneider, K. A. (2020). HistoRank: History-Based Ranking of Co-change Candidates. In *2020 IEEE 27th International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering (SANER)* (pp. 240–250). 2020 IEEE 27th International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering (SANER). IEEE. https://doi.org/10.1109/saner48275.2020.9054869

УДК 004.056 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.29

К. С. МОСКВІН
магістрант кафедри безпеки інформаційних та комунікаційних систем
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0006-5323-1488

О. В. СЄВЄРІНОВ
кандидат технічних наук, доцент,
професор кафедри безпеки інформаційних технологій
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0002-6327-6405

З. М. СИДОРЕНКО
асистент кафедри безпеки інформаційних технологій
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0002-0104-6807

Д. С. БАЛАГУРА
кандидат технічних наук,
доцент кафедри безпеки інформаційних технологій
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0006-9839-3317

А. В. ЛИТВИН
старший викладач кафедри радіоелектронних систем пунктів управління
Харківський національний університет повітряних сил
імені Івана Кожедуба
ORCID: 0000-0003-1962-6356

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІНТЕГРАЦІЇ ЗАСОБІВ КІБЕРЗАХИСТУ НА ЗАХИЩЕНІСТЬ ІТ-ІНФРАСТРУКТУРИ ОРГАНІЗАЦІЇ

У статті розглянуто актуальну проблему забезпечення кібербезпеки в умовах зростаючої кількості складних і багатовекторних атак на корпоративні ІТ-інфраструктури. Обґрунтовано необхідність переходу від ізольованого застосування засобів захисту до комплексного інтегрованого підходу, що передбачає взаємодію між NGFW, EDR, SIEM, PAM, IAM та MDM. Зазначено, що значна частина порушень безпеки спричинена недостатньою координацією між компонентами кіберзахисту, що унеможливлює виявлення складних атак на ранніх етапах.

На основі аналізу сучасних досліджень і статистичних даних досліджено типові вразливості ІТ-систем, ключові вектори атак, а також недоліки у поточній практиці управління безпекою. Запропоновано архітектурну модель багаторівневого захисту, яка дозволяє створити єдине інформаційне середовище для кореляції даних про загрози, управління доступом та забезпечення реагування в реальному часі. Увагу зосереджено на практичному впливі впровадження інтегрованих систем на підвищення рівня захищеності, зменшення часу виявлення загроз та підвищення ефективності реагування на інциденти. Також акцентовано на покращенні продуктивності ІТ-відділів завдяки автоматизації рутинних процесів та централізованому управлінню безпекою.

У роботі запропоновано рекомендації щодо впровадження інтегрованої моделі кіберзахисту з урахуванням поточних потреб організацій та вимог стандартів, таких як ISO/IEC 27001, NIST Cybersecurity Framework. Результати дослідження є корисними для ІТ-менеджерів, фахівців із кібербезпеки та керівництва організацій, що прагнуть зміцнити інформаційну безпеку своєї інфраструктури. Окремо виділено вплив технологічної інтеграції на зменшення людського фактору у реагуванні на інциденти та формування безпечного цифрового середовища.

Ключові слова: *кібербезпека, ІТ-інфраструктура, інтеграція засобів захисту, багаторівневий захист, NGFW, EDR, SIEM, PAM, IAM, MDM, управління доступом, реагування на загрози.*

K. S. MOSKVIN
Master's Student at the Department of Information Technologies Security
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0006-5323-1488

O. V. SIEVIERINOV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Information Technologies Security
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0002-6327-6405

Z. M. SYDORENKO
Assistant at the Department of Information Technology Security
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0002-0104-6807

D. S. BALAGURA
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Information Technology Security
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0006-9839-3317

A. V. LYTVYN
Senior Instructor at the Department of Radioelectronic Systems of Control Points
Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University
ORCID: 0000-0003-1962-6356

RESEARCH ON THE IMPACT OF CYBERSECURITY TOOLS INTEGRATION ON THE SECURITY OF AN ORGANIZATION'S IT INFRASTRUCTURE

The article addresses the pressing issue of ensuring cybersecurity in the context of increasing numbers of complex and multi-vector attacks on corporate IT infrastructures. It substantiates the need to transition from isolated security tools to a comprehensive, integrated approach that ensures the interaction between NGFW, EDR, SIEM, PAM, IAM, and MDM. It is noted that a significant portion of security breaches is caused by insufficient coordination between cybersecurity components, which hinders the early detection of complex attacks.

Based on the analysis of current research and statistical data, typical vulnerabilities of IT systems, key attack vectors, and weaknesses in current security management practices are examined. An architectural model of multi-layered protection is proposed, enabling the creation of a unified information environment for correlating threat data, managing access, and providing real-time incident response. Special attention is given to the practical impact of integrated systems on enhancing infrastructure protection, reducing threat detection time, and improving incident response efficiency. The article also emphasizes the improvement in IT department productivity through the automation of routine tasks and centralized security management.

Recommendations are proposed for implementing an integrated cybersecurity model that takes into account the current needs of organizations and the requirements of standards such as ISO/IEC 27001 and the NIST Cybersecurity Framework. The results of the study are valuable for IT managers, cybersecurity professionals, and organizational leadership seeking to strengthen their information security. The impact of technological integration on reducing human factor involvement in incident response and establishing a secure digital environment is separately highlighted.

Key words: *cybersecurity, IT infrastructure, security tools integration, multilayered protection, NGFW, EDR, SIEM, PAM, IAM, MDM, access management, incident response.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах цифрової трансформації бізнесу та державного управління інформаційні технології стають основою функціонування більшості процесів. Разом із цим зростає складність ІТ-інфраструктур, кількість взаємозалежних систем, сервісів та облікових записів, що, у свою чергу, збільшує площу потенційних атак і вразливих точок. Усе частіше організації стають жертвами багаторівневих та багатовекторних кібератак, які використовують як технічні уразливості, так і людський фактор.

Основна проблема полягає в тому, що більшість організацій досі використовують фрагментовані, слабо інтегровані рішення для захисту: міжмережеві екрани, антивіруси, засоби контролю доступу, системи моніторингу тощо. Вони часто функціонують автономно, без належного обміну даними, кореляції подій і централізованого реагування. Такий підхід унеможливлює оперативне виявлення складних атак, знижує ефективність інцидент-менеджменту та не дозволяє будувати повноцінну систему кіберзахисту, яка відповідає сучасним викликам.

Крім того, в умовах гібридної інфраструктури (поєднання локальних і хмарних ресурсів, використання особистих пристроїв працівників, мобільних доступів тощо) питання управління доступом, контролю кінцевих точок та шифрування даних стає критично важливим. Однак ізольоване впровадження рішень IAM, PAM, MDM або EDR не забезпечує очікуваного рівня захищеності без їхньої взаємодії через єдину платформу управління та аналітики.

Ще одним проблемним аспектом є відсутність належної автоматизації процесів реагування, аналізу загроз і оновлення політик безпеки. В умовах обмежених людських ресурсів і великого обсягу подій безпеки саме автоматизація стає ключовим фактором підвищення ефективності захисту. Водночас, рівень впровадження таких засобів, як SIEM, SOAR або поведінковий аналіз, залишається низьким у більшості організацій.

Таким чином, проблема полягає не лише в наявності кіберзагроз, а в неузгодженості, неефективності та недостатній зрілості більшості реалізованих систем захисту. Це обґрунтовує необхідність дослідження впливу комплексної інтеграції засобів кібербезпеки на підвищення захищеності ІТ-інфраструктури, а також розробки архітектурних підходів, що дозволяють досягати високої стійкості до загроз при мінімізації витрат і людського фактору.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Актуальність інтегрованих підходів до кіберзахисту підтверджується значною кількістю сучасних наукових досліджень. У роботі K. Scarfone та P. Mell [1], опублікованій у рамках ініціативи NIST, детально аналізуються можливості систем виявлення та запобігання вторгненням (IDPS) і підкреслюється важливість їх інтеграції з іншими компонентами безпеки для досягнення високої ефективності. Автори наголошують на необхідності використання уніфікованої політики реагування та централізованого збору журналів подій як основи для побудови захищених систем.

У статті A. Yaseen [2] зроблено акцент на автоматизованому управлінні інфраструктурою для підвищення рівня кіберзахисту. Дослідження демонструє, що автоматизація процесів моніторингу, виявлення загроз та управління конфігураціями істотно знижує ризики, пов'язані з людським фактором. Автор обґрунтовує ефективність поєднання інструментів SIEM, IAM та MDM у межах єдиного підходу до керування безпекою.

Робота Y. Kilani та E. Abu-Shanab [3] досліджує вплив кібербезпеки на внутрішні організаційні процеси. Автори встановлюють, що високий рівень технологічної інтеграції рішень кіберзахисту позитивно корелює з підвищенням ефективності управління, зниженням затримок у прийнятті рішень та покращенням якості обслуговування. Таким чином, кібербезпека розглядається не лише як технічна необхідність, а як стратегічний фактор розвитку організацій.

Доповненням до зазначених досліджень є робота A. Vázquez-Ingelmo [4], де розглядається вплив SIEM на швидкість реагування на інциденти при використанні з EDR та IAM у межах автоматизованих сценаріїв реагування.

Таким чином, наукова спільнота підтверджує, що ефективне підвищення рівня захищеності ІТ-інфраструктури можливе лише за умови взаємодії між усіма компонентами системи безпеки. Поєднання автоматизації, централізованого моніторингу та управління доступом формує основу для створення надійного, адаптивного та масштабованого захисного середовища.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження зосереджена на розробці концепції багаторівневої інтегрованої архітектури кіберзахисту для організаційних ІТ-інфраструктур. В умовах зростання складності загроз та технологічного навантаження, ефективна інтеграція засобів безпеки (NGFW, EDR, SIEM, IAM, PAM, MDM) стає ключовим чинником забезпечення стійкості до атак. Актуальність теми обумовлена необхідністю швидкого реагування, централізованого моніторингу та мінімізації людського фактору в інцидент-менеджменті.

Дослідження передбачає аналіз існуючих архітектур безпеки, вивчення практик інтеграції різнорідних компонентів захисту, а також виявлення бар'єрів, що заважають побудові єдиного середовища управління. Основна мета полягає в тому, щоб обґрунтувати модель ефективної взаємодії між компонентами кіберзахисту, яка забезпечить зменшення часу реагування, підвищення точності детекції та покращення загальної інформаційної безпеки організації.

Очікувані результати включають методичні рекомендації щодо впровадження інтегрованої архітектури, приклади оптимальних конфігурацій і механізмів взаємодії, що зможуть підвищити безпеку як комерційних, так і критичних державних ІТ-систем.

Викладення основного матеріалу дослідження

Сучасний розвиток інформаційних технологій супроводжується стрімким збільшенням кількості кіберзагроз, які становлять небезпеку для корпоративних середовищ. За статистикою [5]:

– 24 мільярди скомпрометованих облікових даних пропонуються для продажу у неконтрольованих сегментах Інтернет;

– 97 % підприємств покладаються на застарілу або гібридну інфраструктуру IAM (управління ідентифікацією та доступом);

– 82 % порушень даних і атак програм-вимагачів включають або базуються на скомпрометованих облікових даних користувачів;

– більш ніж 80 % порушень безпеки пов'язані з викраденням або компрометацією автентифікаційних даних.

Кіберзлочинці використовують різноманітні вектори атак, включаючи скомпрометовані облікові записи, несанкціонований доступ до систем, зловживання мобільними пристроями, а також недостатній рівень захисту мережі. Інтеграція ефективних засобів кіберзахисту є ключовим фактором у забезпеченні безпеки ІТ-інфраструктури та збереженні її продуктивності.

За статистикою, понад 60 % кібератак здійснюється через скомпрометовані облікові записи, що підкреслює важливість рішень для управління доступом, таких як PAM (управління привілейованим доступом) та IAM (управління ідентифікацією та доступом). У статті розглянуто вплив інтеграції різних рішень, таких як NGFW (фаєрволи нового покоління), EDR (виявлення та реагування на загрози для кінцевих пристроїв), SIEM (системи управління інформацією та подіями безпеки), PAM, IAM та MDM (управління мобільними пристроями), на захищеність IT-інфраструктури.

Вразливості корпоративних систем

Вразливості корпоративних систем залишаються однією з основних причин успішних кібератак. Це свідчить про постійне зростання кількості уразливих місць, які можуть бути використані зловмисниками для атак на корпоративні середовища. Вразливості можуть виникати як у програмному забезпеченні, так і в апаратних компонентах системи, створюючи можливості для зловмисників отримати доступ до конфіденційної інформації або порушити роботу корпоративної мережі.

Одним із основних факторів, що сприяють появі нових вразливостей, є постійна складність і розвиток програмного забезпечення, а також прискорений цикл розробки продуктів. Часто виробники прагнуть швидко випустити нові функції, і це може призвести до виникнення недоліків у безпеці. Важливим аспектом для забезпечення кібербезпеки є своєчасне виявлення та виправлення таких вразливостей, що досягається шляхом регулярних оновлень та патчів безпеки.

До основних типів вразливостей належать [6]:

– застаріле або невиправлене програмне забезпечення;
– слабкі паролі;
– відсутність контролю доступу;
– недостатнє навчання співробітників;
– недостатньо захищені мережеві інтерфейси.

Врахування вразливостей дозволяє компаніям ефективніше захищати свої інформаційні ресурси та знижувати ризик успішних атак. Аналіз вразливостей має бути невід'ємною частиною процесу управління ризиками, а заходи щодо їх усунення повинні здійснюватися на постійній основі.

Ключовими векторами атак є:

– скомпрометовані облікові записи;
– небезпечні кінцеві пристрої;
– недостатній рівень захисту мережевого периметру;
– несанкціонований доступ.

Для забезпечення ефективного захисту корпоративної мережі організації необхідно врахувати такі аспекти:

– перед впровадженням будь-яких рішень слід провести аудит безпеки для визначення слабких місць, пріоритизації загроз та оцінки поточного стану безпеки;

– засоби захисту слід впроваджувати поетапно. Спершу організація має забезпечити захист периметра мережі через NGFW, потім встановити EDR для кінцевих пристроїв, інтегрувати IAM та PAM для управління доступом і завершити впровадження SIEM для моніторингу подій;

– усі рішення повинні бути інтегровані в єдину екосистему. Наприклад, дані з NGFW мають надходити в SIEM для аналізу, а інформація про підозрілу активність передаватись до EDR для ізоляції заражених пристроїв;

– забезпечення кібербезпеки неможливе без навчання співробітників.

Архітектура системи захисту IT-інфраструктури

Багатошарова система захисту є ключовим елементом ефективної стратегії кібербезпеки, оскільки забезпечує захист на різних рівнях корпоративної інфраструктури. Такий підхід дозволяє значно знизити ризик успішного проникнення зловмисників, оскільки кожен шар захисту створює додаткову перешкоду для атакуючих.

Багатошарова система захисту включає такі компоненти, як мережевий захист (міжмережеві екрани, IDS/IPS), захист кінцевих точок (антивірусне програмне забезпечення, EDR), управління ідентифікацією та доступом (IAM), а також системи шифрування даних. Кожен із цих елементів доповнює інші, забезпечуючи комплексний підхід до захисту корпоративних ресурсів. Перелік рішень кібербезпеки для побудови багатошарової системи захисту наведений на рисунку 1.

Як видно з рисунку 1 загальна структура архітектури захисту складається з умовних 4 рівнів, кожен з яких обробляє ризики відповідно до завдань та можливостей. Кожен рівень покладається на велику кількість інструментів, які можуть працювати як окремо, так і у співпраці один з одним. Ми зосередимось на найбільш важливих з них [7].

Архітектура системи захисту IT-інфраструктури складається з певного набору компонентів, який де-факто використовується у більшості найбільш захищених IT-інфраструктур. Ця архітектура дозволяє створити багаторівневий захист, забезпечуючи ефективну взаємодію між усіма компонентами. До цих компонентів відносяться:

– використання NGFW для аналізу трафіку, блокування загроз та забезпечення сегментації мережі;
– використання EDR для моніторингу, виявлення та автоматичного реагування на загрози кінцевих пристроїв;

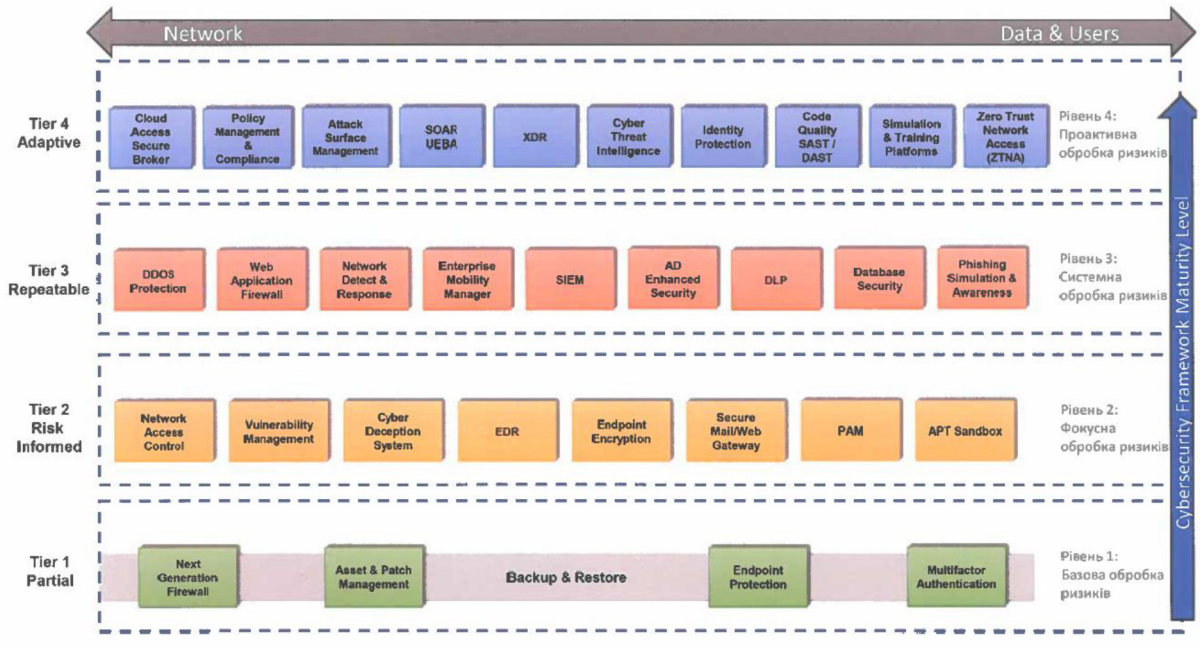


Рис. 1. Перелік рішень багатошарової системи захисту

– використання IAM для багатофакторної автентифікації та PAM для управління привілейованими обліковими записами при централізованому управлінні доступом;
– використання SIEM для аналізу подій у реальному часі та виявлення складних атак;
– використання MDM для управління політиками доступу та шифрування даних на мобільних пристроях.

Ця архітектура дозволяє створити багаторівневий захист, забезпечуючи ефективну взаємодію між усіма компонентами.

Розглянемо, які переваги надає використання кожного компоненту, що були розглянуті вище, з точки зору підвищення захищеності інфраструктури в цілому.

Вплив інтеграції NGFW

Фаєрволи нового покоління NGFW є критично важливим елементом сучасної кібербезпеки [8, 9], який забезпечує багаторівневий захист інфраструктури (рис. 2). Вони здатні глибоко аналізувати трафік у реальному часі, блокуючи потенційні загрози ще до того, як вони зможуть завдати шкоди.

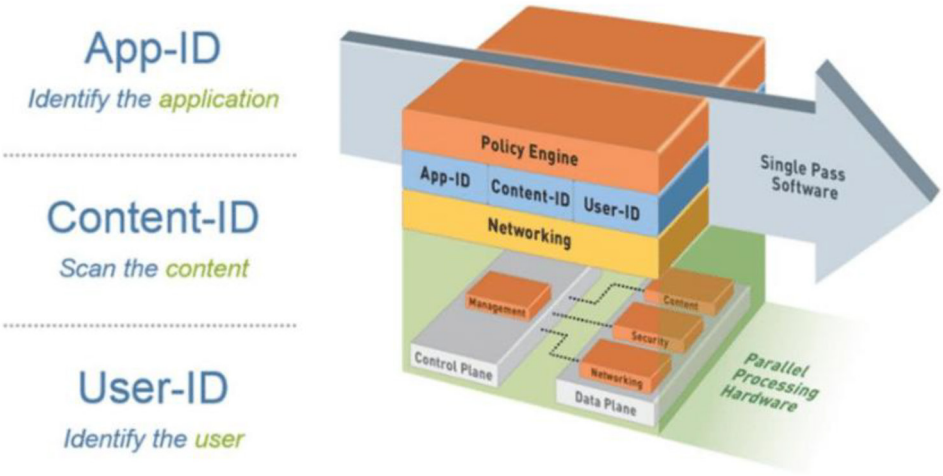


Рис. 2. Next-Generation Firewall

Одним із важливих аспектів NGFW є інтеграція з системами виявлення та запобігання вторгнень (IPS). NGFW враховує контекст мережевого з'єднання, такий як користувач, додаток, місцезнаходження та інші параметри, при прийнятті рішення про блокування або допуск трафіку. Розширений аналіз дозволяє не лише блокувати відомі загрози, але й ідентифікувати нові, використовуючи поведінкові моделі та методи машинного навчання. Також

це дозволяє розуміти, які дії є допустимими в конкретному контексті і зменшує ризик некоректного визначення стосовно атак чи нормальної поведінки користувача або системи.

Інтеграція NGFW з іншими системами моніторингу дає змогу обмінюватися даними між різними рішеннями, виявляючи складні багатовекторні атаки. Завдяки цьому організації можуть своєчасно реагувати на загрози, запобігати масштабним інцидентам і координувати заходи безпеки на всіх рівнях. Крім того, NGFW забезпечує контроль додатків, блокуючи небезпечні чи небажані програми, які можуть бути використані зловмисниками для експлойтів або викрадення інформації. Це дозволяє уникнути проникнення небезпечних програм у корпоративну мережу, зменшуючи ризик втрати даних або компрометації системи.

Роль EDR у захисті кінцевих пристроїв

Рішення EDR забезпечують моніторинг, виявлення та реагування на загрози для кінцевих пристроїв [10–12]. EDR пропонують декілька ключових функцій, які дозволяють суттєво підвищити рівень безпеки в організації (рис. 3).

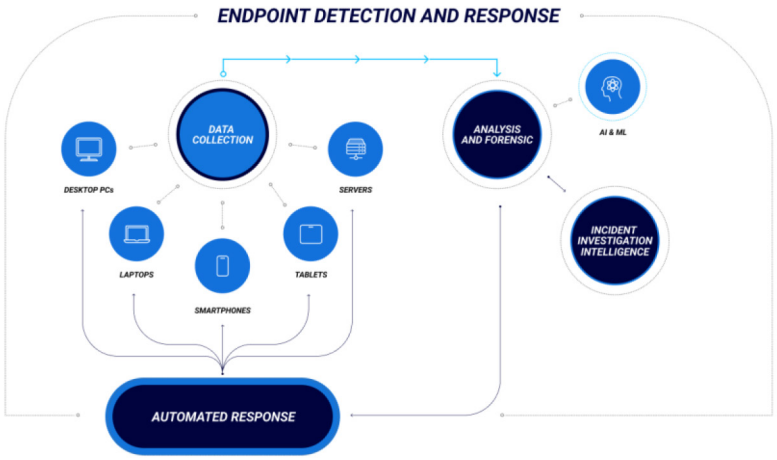


Рис. 3. Система типу EDR

EDR здійснює детальний моніторинг поведінки користувачів та процесів на кінцевих пристроях. Це включає аналіз відхилень від нормальної активності, таких як незвичні запити до ресурсів, підозріла активність програм чи виконання невідомих скриптів, що дозволяє отримувати повну інформацію про всі дії, які виконуються на пристроях, включаючи запуск додатків, зміну файлів, підключення до мережі та інші ключові події. Завдяки такому підходу система може виявляти потенційні загрози ще на етапі їх зародження, що дозволяє уникнути серйозних наслідків.

Автоматичне реагування є важливою перевагою EDR. У разі виявлення загрози система може миттєво ізолювати заражений пристрій від мережі, зупинити виконання шкідливого програмного забезпечення та видалити його з системи. Це мінімізує ризик поширення атаки на інші частини інфраструктури та скорочує час простою, викликаного інцидентом. Окрім автоматизації, EDR надає командам з кібербезпеки потужні інструменти для розслідування інцидентів.

Додатковою перевагою EDR є його інтеграція з іншими системами кібербезпеки, такими як SIEM, SOAR та рішення для управління ідентифікацією. Завдяки цьому EDR стає частиною комплексної стратегії захисту, що охоплює всі рівні інфраструктури організації.

Ще однією важливою функцією є здатність EDR працювати з хмарними середовищами, забезпечуючи однаковий рівень захисту як для локальних пристроїв, так і для ресурсів у хмарі. Це особливо важливо в умовах сучасної гібридної інфраструктури, коли співробітники можуть працювати з різних пристроїв і з різних місць.

Загалом EDR дозволяє організаціям не лише захищати свої кінцеві точки, але й підвищувати загальну стійкість до кіберзагроз.

Важливість PAM та IAM

Управління привілейованим доступом (PAM) є ключовим інструментом для захисту критичних систем та облікових записів [13]. Воно дозволяє створити і впровадити механізми контрольованого і безпечного доступу до найбільш чутливих ресурсів організації.

Однією з основних функціональних можливостей PAM є централізоване управління обліковими записами з підвищеними правами. Це забезпечує єдиний підхід до зберігання, створення, ротації та моніторингу привілейованих облікових записів. PAM дозволяє автоматично змінювати паролі або ключі доступу відповідно до політик безпеки, що значно знижує ризик їх компрометації.

PAM-рішення також забезпечують детальний аудит та моніторинг активності користувачів, які використовують привілейовані облікові записи [14]. Додатковою перевагою PAM є можливість розмежування прав доступу за принципом найменших привілеїв (Least Privilege). Це означає, що користувачі отримують лише ті права доступу, які необхідні для виконання їхніх завдань. Такий підхід мінімізує ризик помилкових дій або зловмисного використання привілейованих облікових записів.

PAM також пропонує можливості ізоляції та захисту сесій, що використовуються для підключення до критичних систем. Це забезпечує додатковий рівень контролю над доступом до серверів, баз даних, мережевого обладнання та інших ресурсів. Наприклад, сесії можуть бути автоматично перервані у разі виявлення підозрілої активності.

Інтеграція PAM із системами багатофакторної автентифікації (MFA) підвищує рівень захисту привілейованих облікових записів. Завдяки цьому навіть у разі компрометації пароля зловмисник не зможе отримати доступ до критичних систем без додаткової перевірки, наприклад, через одноразовий код або біометричні дані.

Крім того, PAM автоматизує процес ротації паролів привілейованих облікових записів. Ця функція забезпечує регулярне оновлення облікових даних, унеможливлюючи їх компрометацію через тривале використання. Такий підхід також знижує залежність від людського фактору в управлінні доступом.

Ще однією перевагою PAM є здатність інтегруватися з іншими системами безпеки, такими як SIEM, IAM та EDR. Це дозволяє створити комплексний підхід до захисту інфраструктури, забезпечуючи обмін інформацією про інциденти та спрощуючи реагування на загрози.

Використання PAM дозволяє організаціям підвищити безпеку своїх облікових записів, знизити ризики внутрішніх і зовнішніх загроз та забезпечити відповідність сучасним стандартам і регуляторним вимогам у сфері кібербезпеки.

Системи управління ідентифікацією та доступом (IAM) в свою чергу відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки корпоративного середовища [15] (рис. 4). Вони забезпечують ефективне управління доступом до ресурсів організації через управління цифровими ідентичностями користувачів і контролю доступу до ресурсів у межах організації, що знижують ризик несанкціонованих дій. Крім того, сучасні IAM рішення підтримують використання єдиного входу (Single Sign-On, SSO), що дозволяє користувачам отримувати доступ до всіх необхідних ресурсів за допомогою однієї аутентифікації, підвищуючи зручність та безпеку.

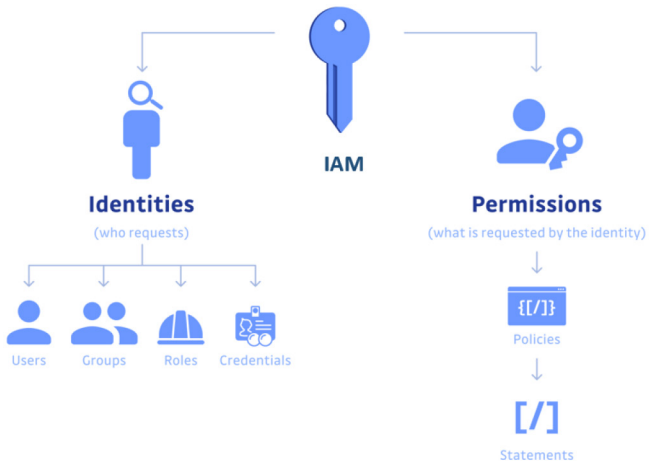


Рис. 4. Система типу IAM

Функція єдиної точки входу (SSO) дозволяє користувачам використовувати один набір облікових даних для доступу до всіх корпоративних систем. Це не лише спрощує процес автентифікації, але й знижує ризик компрометації через зменшення кількості паролів, які потрібно запам'ятовувати чи зберігати.

Інтеграція MDM

Рішення для управління мобільними пристроями (MDM) дозволяють організаціям забезпечувати безпечний та контрольований доступ до корпоративних ресурсів через мобільні платформи. Вони надають широкі можливості щодо централізованого керування мобільними пристроями (рис. 5), підвищуючи рівень безпеки та захищаючи дані компанії.

Однією з ключових функцій MDM є управління політиками безпеки. Це дозволяє встановлювати чіткі правила, які обмежують доступ до корпоративних ресурсів для пристроїв, що не відповідають встановленим вимогам безпеки.

MDM також забезпечує автоматичне шифрування корпоративних даних, що зберігаються на мобільних пристроях. Це запобігає витоку конфіденційної інформації у разі втрати або компрометації пристрою. Крім того, такі



Рис. 5. Функціональні можливості MDM

рішення дозволяють адмініструвати процеси доступу до корпоративних додатків, забезпечуючи безпеку даних навіть у випадках використання особистих пристроїв співробітниками.

У разі втрати або крадіжки пристрою адміністратори можуть оперативно видалити всі корпоративні дані з пристрою, мінімізуючи ризики витоку інформації. Це дозволяє організації забезпечувати високий рівень безпеки навіть у непередбачуваних ситуаціях.

Роль SIEM у забезпеченні комплексного захисту

Системи управління інформацією та подіями безпеки (SIEM) є центральним елементом інтеграції багаторівневих рішень кіберзахисту. Вони об'єднують дані з різних джерел, таких як NGFW, EDR, MDM, та забезпечують їхню кореляцію для виявлення загроз.

SIEM аналізує журнали подій і системні дані в реальному часі, ідентифікуючи аномальні патерни, які можуть вказувати на спроби атаки. Це дозволяє організаціям оперативно реагувати на загрози, запобігаючи їхньому поширенню.

Однією з ключових переваг SIEM є автоматизована аналітика, яка допомагає виявляти складні багатовекторні атаки. Крім того, SIEM забезпечує функціонал для створення звітів, необхідних для дотримання нормативних вимог. Це робить систему незамінним інструментом не лише для безпеки, але й для управління відповідністю.

Інтеграція SIEM із загальною екосистемою кіберзахисту значно підвищує ефективність реагування на інциденти, мінімізуючи збитки від атак та забезпечуючи цілісність корпоративної мережі.

Захищеність та продуктивність IT-інфраструктури

Інтеграція засобів кіберзахисту не лише значно підвищує рівень захищеності IT-інфраструктури, але й сприяє підвищенню її продуктивності. Це досягається завдяки оптимізації процесів, зниженню простоїв і раціональному використанню ресурсів. Основними напрямами впливу є:

– оптимізація процесів безпеки завдяки автоматизації рутинних завдань, таких як моніторинг, оновлення систем безпеки та аналіз загроз, ресурси організації спрямовуються на більш стратегічні ініціативи. Це дозволяє знизити ризики людських помилок та підвищити ефективність реагування на інциденти. Крім того, автоматизація зменшує навантаження на команди IT, дозволяючи їм зосередитися на вдосконаленні інфраструктури;

– швидке виявлення та мінімізація впливу атак засобами кіберзахисту. Це значно скорочує потенційний збиток і знижує ризик поширення атак на інші частини інфраструктури. Одночасно це дозволяє уникнути значних простоїв, забезпечуючи безперервність бізнес-процесів;

– надійно захищена IT-інфраструктура демонструє партнерам і клієнтам високий рівень відповідальності за безпеку даних, що сприяє зміцненню репутації організації та формуванню довгострокових бізнес-відносин. Крім того, прозорість і ефективність безпеки підвищують довіру співробітників, які працюють у захищеному цифровому середовищі.

Завдяки цим аспектам організації отримують не лише підвищений рівень безпеки, але й створюють основу для подальшого розвитку та ефективного функціонування в умовах зростаючих кіберзагроз.

Висновки

Проведене дослідження, присвячене розробці багаторівневої інтегрованої архітектури кібербезпеки, підтвердило доцільність комплексного підходу до побудови системи захисту IT-інфраструктури. Аналіз сучасних

вразливостей показав, що традиційні ізольовані рішення вже не забезпечують належного рівня стійкості до складних багатовекторних атак, особливо в умовах зростання обсягів даних, децентралізації та розвитку гібридних середовищ.

Запропонована архітектура охоплює чотири рівні кіберзахисту – периметр, кінцеві точки, контроль доступу та централізовану аналітику – і забезпечує ефективну взаємодію між такими системами як NGFW, EDR, PAM, IAM, SIEM та MDM. Її реалізація дозволяє формувати цілісний ландшафт безпеки, що здатен адаптуватися до нових загроз, зменшує навантаження на аналітиків SOC та скорочує час реагування на інциденти.

Інтеграція рішень забезпечує обмін подіями безпеки між компонентами, дає змогу автоматизувати виявлення загроз і оперативне прийняття рішень у реальному часі. Такий підхід дозволяє не лише своєчасно виявляти атаки, але й блокувати їх ще до нанесення шкоди.

Практична цінність запропонованої архітектури полягає у її масштабованості, відповідності вимогам сучасних стандартів безпеки (NIST, ISO/IEC 27001) та можливості поетапного впровадження в умовах обмежених ресурсів. Дослідження також демонструє, що побудова інтегрованої системи безпеки є ключовим фактором у підвищенні цифрової стійкості організацій.

Отже, впровадження багаторівневої архітектури з інтегрованими інструментами кібербезпеки є ефективним рішенням для захисту корпоративного середовища від складних та еволюційних кіберзагроз.

Список використаної літератури

1. Scarfone K., Mell P. Guide to Intrusion Detection and Prevention Systems (IDPS). NIST Special Publication 800-94. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2007. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-94/final

2. Yaseen A. Enhancing Cybersecurity through Automated Infrastructure Management: A Comprehensive Study on Optimizing Security Measures. ResearchGate. 2024. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/378594258

3. Kilani Y., Cyber-security effect on organizational internal process: mediating role of technological infrastructure. Problems and Perspectives in Management. № 18(1). 2020. pp 449-460 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/340490846

4. Vázquez-Ingelmo A., García-Holgado A., García-Peñalvo F. J. A SIEM-based Framework for Automated Cybersecurity Incident Response. Lecture Notes in Computer Science. V. 13327. 2022. P. 370–385. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-09243-8_29

5. Network Infrastructure Security 2023: National Security Agency Cybersecurity Technical Report, 2023. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://media.defense.gov/2022/Jun/15/2003018261/-1/-1/0/CTR_NSA_ NETWORK_INFRASTRUCTURE_SECURITY_GUIDE_20220615.PDF

6. Open Web Application Security Project (OWASP). OWASP Top Ten. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://owasp.org/www-project-top-ten/

7. ISO/IEC 27001:2022. Information Security Management Systems. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.iso.org/standard/27001

8. Check Point Software Technologies. Next-Generation Firewall. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.checkpoint.com/cyber-hub/network-security/what-is-next-generation-firewall-ngfw/

9. National Institute of Standards and Technology (NIST). Cybersecurity Framework. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.nist.gov/cyberframework

10. Gartner Peer Insights. Reviews for Endpoint Protection Platforms. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.gartner.com/reviews/market/endpoint-protection-platforms.

11. Шуліка, К., Балагура, Д. і Сидоренко, З. Аналіз методів обходу сучасних систем захисту кінцевих точок EDR, Радіотехніка, № 2(217), 2024, с. 64–68. DOI: https://doi.org/10.30837/rt.2024.2.217.05.

12. Шуліка, К., Балагура, Д., Смірнов, А., Непокритов, Д., Литвин, А. Метод використання сучасних систем захисту кінцевих точок (EDR) для убезпечення від комплексних атак. СУЧАСНИЙ СТАН НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ТЕХНОЛОГІЙ В ПРОМИСЛОВОСТІ, № 2(28), 2024, с. 182–195. https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.2.182

13. Wallix Bastion. Privileged Access Management. [Електронний ресурс]. Режим доступу: Https://www.wallix.com/products/privileged-access-management/.

14. Delinea PAM Solution. Securing Privileged Accounts. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://delinea.com/what-is/privileged-access-management-pam.

15. Silverfort IAM Solution. Adaptive Authentication and Access Control. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.silverfort.com/

References

1. Scarfone K., Mell P. Guide to Intrusion Detection and Prevention Systems (IDPS). NIST Special Publication 800-94. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2007. Retrieved from: https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-94/final

2. Yaseen A. Enhancing Cybersecurity through Automated Infrastructure Management: A Comprehensive Study on Optimizing Security Measures. ResearchGate. 2024. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/378594258

3. Kilani Y., (2020) Cyber-security effect on organizational internal process: mediating role of technological infrastructure. Problems and Perspectives in Management. no.18(1). pp 449–460.

4. Vázquez-Ingelmo A., García-Holgado A., García-Peñalvo F. J. A SIEM-based Framework for Automated Cybersecurity Incident Response. Lecture Notes in Computer Science. V. 13327. 2022. P. 370–385. Retrieved from: https://doi.org/10.1007/978-3-031-09243-8_29

5. Network Infrastructure Security 2023: National Security Agency Cybersecurity Technical Report, 2023. 40 c.; Retrieved from: https://media.defense.gov/2022/Jun/15/2003018261/-1/-1/0/CTR_NSA_ NETWORK_ INFRASTRUCTURE_SECURITY_GUIDE_20220615.PDF

6. Open Web Application Security Project (OWASP). OWASP Top Ten. Retrieved from: https://owasp.org/www-project-top-ten/

7. ISO/IEC 27001:2022. Information Security Management Systems. Retrieved from: https://www.iso.org/standard/27001

8. Check Point Software Technologies. Next-Generation Firewall. Retrieved from: https://www.checkpoint.com/cyber-hub/network-security/what-is-next-generation-firewall-ngfw/

9. National Institute of Standards and Technology (NIST). Cybersecurity Framework. Retrieved from: https://www.nist.gov/cyberframework

10. Gartner Peer Insights. Reviews for Endpoint Protection Platforms. Retrieved from: https://www.gartner.com/reviews/market/endpoint-protection-platforms.

11. Shulika, K., Balagura, D., Sydorenko, Z. (2024). Analiz metodiv obhodu suchasnyh cyctem zahystu kincevyh tochok EDR [Analysis of methods for bypassing modern EDR endpoint protection systems.] Radiotekhnika, no.2(217), pp 64–68.

12. Shulika, K., Balagura, D., Smirnov, A., Nepokrytov, D., & Lytvyn, A. (2024). Metod vykorystannya suchasnyh system zahystu kincevyh tochok (EDR) dlya ubezpechennya vid kompleksnyh atak [A method of using modern endpoint detection and response (EDR) systems to protect against complex attacks.] INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SCIENTIFIC SOLUTIONS FOR INDUSTRIES, no. 2(28), pp. 182–195.

13. Wallix Bastion. Privileged Access Management. Retrieved from: Https://www.wallix.com/products/privileged-access-management/.

14. Delinea PAM Solution. Securing Privileged Accounts. Retrieved from: https://delinea.com/what-is/privileged-access-management-pam.

15. Silverfort IAM Solution. Adaptive Authentication and Access Control. Retrieved from: https://www.silverfort.com/

УДК 004 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.30

А. О. НІКІТЕНКО
аспірант кафедри прикладної математики та інформатики
Донецький національний технічний університет
ORCID: 0009-0006-1363-2324

ПРОЦЕС СТВОРЕННЯ АВТОРСЬКОГО ДАТАСЕТУ ДЛЯ ДОНАВЧАННЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ВИЯВЛЕННЯ МЕРЕЖЕВИХ ВТОРГНЕНЬ НА ОСНОВІ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ

У статті висвітлено процес створення авторського набору реальних мережевих потокових даних, призначеного для донавчання моделей систем виявлення мережевих вторгнень (NIDS), побудованих на методах глибокого навчання. Зважаючи на обмежену доступність сучасних, повноцінних і різноманітних датасетів, автори розробили комплексну методологію формування такого набору в контрольованому середовищі, яке імітує реалістичні умови функціонування корпоративної мережі. Для генерації трафіку використовувались як легітимні дії звичайних користувачів (перегляд вебсторінок, обмін файлами, електронна пошта тощо), так і різноманітні кіберзагрози, зокрема DDoS, DoS, розвідка (Reconnaissance), атаки на вебзастосунки, Brute-force та інші. Інструменти типу metasploit, hping3, slowloris, Hydra та інші були задіяні для симуляції атак, а легітимний трафік створювався шляхом автоматизованої активності з кількох вузлів, що імітували поведінку звичайних користувачів. Особливу увагу приділено адаптації процесу збору даних до обмежених ресурсів, без втрати якості чи репрезентативності зібраного трафіку. Запропоновано підхід до балансування обсягів легітимного та аномального трафіку, що дозволяє ефективно використовувати датасет для задач навчання, донавчання, валідації й тестування моделей NIDS. Крім того, акцент зроблено на структурованості, мітках і метаінформації в зібраних даних, що спрощує подальшу обробку та аналіз. Розроблений датасет може стати цінним ресурсом для дослідницької спільноти в галузі кібербезпеки, особливо в контексті розробки адаптивних та інтелектуальних систем виявлення вторгнень, здатних ефективно розпізнавати як відомі, так і нові типи атак. Отримані результати підтверджують надійність запропонованої методології, високу якість зібраного трафіку та його відповідність сучасним викликам у сфері мережевої безпеки.

Ключові слова: *мережева безпека, NIDS, глибоке навчання, набір даних, мережевий трафік, кіберзагрози, симуляція атак.*

A. O. NIKITENKO
Postgraduate Student at the Department of Applied Mathematics and Informatics
Donetsk National Technical University
ORCID: 0009-0006-1363-2324

THE PROCESS OF CREATING AN AUTHOR'S DATASET FOR RETRAINING MODELS OF NETWORK INTRUSION DETECTION SYSTEMS BASED ON DEEP LEARNING

The article describes the process of creating an author's set of real network streaming data intended for training models of network intrusion detection systems (NIDS) based on deep learning methods. Given the limited availability of modern, complete, and diverse datasets, the authors have developed a comprehensive methodology for generating such a set in a controlled environment that simulates realistic corporate network conditions. To generate traffic, they used both legitimate actions of ordinary users (web browsing, file sharing, e-mail, etc.) and various cyber threats, including DDoS, DoS, reconnaissance, attacks on web applications, Brute-force, and others. Tools such as Metasploit, Hping3, Slowloris, Hydra, and others were used to simulate attacks, and legitimate traffic was created by automated activity from multiple nodes that mimicked the behavior of ordinary users. Particular attention is paid to adapting the data collection process to limited resources, without losing the quality or representativeness of the collected traffic. An approach to balancing the amount of legitimate and abnormal traffic is proposed, which allows the dataset to be effectively used for training, retraining, validation, and testing of NIDS models. In addition, emphasis is placed on the structuredness, labels, and meta-information in the collected data, which simplifies further processing and analysis. The developed dataset can become a valuable resource for the cybersecurity research community, especially in the context of developing adaptive and intelligent intrusion detection systems that can effectively recognize both known and new types of attacks. The obtained results confirm the reliability of the proposed methodology, the high quality of the collected traffic, and its relevance to modern network security challenges.

Key words: *network security, NIDS, deep learning, dataset, network traffic, cyber threats, attack simulation.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах стрімкої цифровізації обсяги мережевого трафіку невпинно зростають, що супроводжується ескалацією кіберзагроз. Системи виявлення мережевих вторгнень (Network Intrusion Detection Systems – NIDS) відіграють ключову роль у захисті інформаційних ресурсів, здійснюючи аналіз мережевого трафіку в режимі реального часу з метою виявлення аномальної або шкідливої активності. Ефективність таких систем значною мірою залежить від якості, різноманітності та репрезентативності наборів даних (датасетів), що використовуються для їх навчання та тестування. Через складність отримання реальних мережевих трас із надійним маркуванням, більшість публічних датасетів для NIDS створюються в контрольованих умовах. Такий підхід дає змогу точно моделювати атаки та керувати параметрами середовища, проте не завжди забезпечує достатню різноманітність і автентичність трафіку, що може обмежувати здатність моделей узагальнюватися на реальні сценарії. Це породжує потребу у вдосконаленні методів генерації навчальних даних для підвищення якості моделей виявлення вторгнень. Попри певні переваги використання публічних датасетів, подібні дані не завжди достовірно відображають реалістичну мережеву поведінку та загрози [1]. З метою подолання цих обмежень у дослідженні представлено новий авторський датасет мережевого трафіку, який поєднує реалістичну активність користувачів із широким спектром сучасних атак. Для його створення розгорнута спеціалізована експериментальна інфраструктура, що включає мережевий пристрій MikroTik, системи атакувальників і жертв на базі операційної системи Ubuntu, а також засоби збору та обробки трафіку – зокрема *tshark* [2] і *CICFlowMeter* [3]. Симуляція атак здійснювалася з використанням провідних інструментів, серед яких *sqlmap* [4], *nmap* [5], *hydra* [6], *hping3* [7], Python-скрипти, *slowhttptest* [8], *fping* [9], *beef-xss* [10] і *msfvenom* [11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У рамках дослідження оглянуто низку наукових публікацій, що висвітлюють сучасні підходи, проблеми та тенденції у створенні мережевих датасетів для NIDS. Представлений аналіз дозволяє оцінити переваги й недоліки існуючих рішень, а також визначити вимоги до побудови власного набору даних.

У роботі [12] запропоновано фреймворк для генерації мережевих наборів даних з реальних трас трафіку, що можуть бути використані у дослідженнях систем виявлення мережевих вторгнень (NIDS). Запропонований підхід дозволяє формувати реалістичні сценарії, які раніше були недоступні. Основною перевагою є можливість поєднання фонового мережевого трафіку, зібраного в реальному середовищі, з трафіком, що містить ознаки атак. Оскільки ці дані не зазнали анонімізації, вони зберігають повну інформацію, що підвищує їхню достовірність. Додатково, створені інструменти сприяють ефективному витягу характеристик мережевих сеансів. До недоліків віднесено залежність від доступності великого обсягу захоплених мережевих трас.

У дослідженні [13] представлено модель CNN-LSTM на основі SFL, що застосовує методи глибокого навчання до аналізу корисного навантаження HTTP-трафіку в умовах високопродуктивного обчислювального середовища. Розроблена система AI-IDS виявляє аномальний трафік, зокрема нові патерни, які недоступні для традиційних NIDS, що базуються на сигнатурах. Це дозволяє автоматично формалізувати нові атаки і вдосконалювати правила сигнатур. Проте система має недолік у вигляді високої кількості хибнопозитивних спрацьовувань, що потребує повторної верифікації подій, тому наразі рекомендовано використовувати її як допоміжну.

У роботі [14] здійснено поглиблений аналіз семи найбільш цитованих еталонних наборів даних для NIDS, у результаті чого виявлено шість характерних «запахів дизайну даних» – повторюваних патернів, які можуть свідчити про недоліки в конструюванні наборів даних. Автори зазначають, що неочевидні дизайнерські рішення можуть істотно вплинути на експериментальні результати. Запропоновано шість евристик для вимірювання цих недоліків. Встановлено, що наявність «запахів» корелює з недостатньою різноманітністю даних, нечітким маркуванням і слабкими критеріями узагальнення. У роботі надано рекомендації для підвищення якості створення і використання наборів даних, що має на меті стимулювати критичний перегляд наявних ресурсів у спільноті дослідників.

Метою роботи [15] є створення нового великого набору даних з атаками на IoT-пристрої. У межах експериментальної інфраструктури з 105 пристроїв було реалізовано 33 атаки, які класифіковано у сім категорій: DDoS, DoS, розвідка, веб-атаки, атаки грубою силою, спуфінг та Mirai. Набір даних надається у відкритому доступі на платформі CIC Dataset. Його особливістю є фокус на атаки між IoT-пристроями, що підвищує актуальність у контексті сучасних загроз.

У роботі [16] проведено огляд наявних публічних наборів даних та визначено проблематику відсутності єдиного підходу до валідації міток, що ускладнює порівнянність результатів і знижує довіру до моделей. Автори закликають до створення динамічних наборів даних з прозорими процедурами маркування та перевірки, що дозволить об'єктивніше оцінювати ефективність підходів до виявлення атак. Основним недоліком є відсутність реалізації запропонованих підходів у вигляді прототипу чи проєкту.

Дослідження [17] висуває нові вимоги до створення IDS-наборів даних: наявність інформації про корисне навантаження, істинні мітки (ground truth), шифрування, анонімізацію, а також забезпечення практичної реалізації. Автори створили новий датасет HIKARI-2021, який містить зашифрований трафік, базується на ознаках

з CICIDS-2017 і доповнений додатковими характеристиками, такими як IP-адреси та порти. Датасет орієнтований на реалістичні сценарії атаки, що дозволяє розширити межі аналізу.

У роботі [18] представлено датасет LITNET-2020, зібраний у реальній академічній мережі. Він містить приклади нормального та зловмисного трафіку, 85 ознак мережевого потоку та 12 типів атак. Було проведено кластерний і статистичний аналіз для оцінки ефективності ознак. Датасет є відкритим для досліджень, проте його недоліком є обмежене охоплення сценаріїв поза академічним середовищем.

У роботі [19] розглянуто можливість використання повністю синтетичних даних, згенерованих за допомогою генеративних змагальних мереж (GAN), для тренування моделей машинного навчання в NIDS. Було використано дані з трьох наборів: UNSW-NB15, NSL-KDD та BoT-IoT. Експерименти показали, що моделі, натреновані на синтетичних даних, досягають точності, порівнянної або вищої за ті, що тренувались на реальному трафіку (до 100 % на BoT-IoT). Це свідчить про потенціал GAN як засобу подолання проблеми обмеженої доступності якісних реальних даних. Автори планують подальше дослідження адаптивних GAN, здатних еволюціонувати разом із новими загрозами.

Аналіз сучасних підходів до створення датасетів для NIDS засвідчує еволюцію від синтетичних, штучно створених наборів до більш реалістичних, динамічних і технічно повних рішень. Класичні датасети (наприклад, KDD'99) часто зазнають критики через застарілість, низьку репрезентативність і наявність артефактів, що призводить до перенавчання моделей і їх неспроможності працювати у реальному середовищі [16]. У відповідь на ці виклики в новітніх дослідженнях акцент зміщується в бік використання або симуляції реального трафіку. Зокрема, у CICIoT2023 [15] та LITNET-2020 [18] трафік записується в умовах, наближених до продуктивних мереж, із широким охопленням атак і збереженням реальних мережевих характеристик.

Типовий процес побудови NIDS-датасету включає кілька ключових етапів: проєктування сценаріїв легітимної активності та атак, налаштування контрольованого середовища (емулятора або фізичної лабораторії), збір трафіку (у форматі PCAP або NetFlow), екстракція ознак (features), маркування з'єднань (наприклад, як «атака» чи «нормальна активність»), а також валідація та попередній аналіз.

Щодо джерел трафіку, умовно їх поділяють на три категорії: реальні, синтетичні та гібридні. Перші базуються на даних із продуктивних або напівреальних середовищ (як-от у LITNET-2020), другі – моделюються у віртуалізованих лабораторіях або генеруються за допомогою моделей штучного інтелекту, зокрема GAN (наприклад, SYN-GAN [19]), тоді як гібридні поєднують справжній фоновий трафік із навмисно створеними атаками [17]. Ефективність моделей глибокого навчання значною мірою залежить від якості та повноти ознак: сучасні датасети містять не лише статистичні характеристики з'єднань (IP, порти, тривалість, кількість пакетів), але й контекстні ознаки, флаги протоколів, інтервали між пакетами тощо.

Попри прогрес, проблемними залишаються питання узгодженості форматів, етичності збору, репрезентативності трафіку та актуальності типів атак. Як показано в роботах [13] та [16], навіть сучасні набори часто не охоплюють Zero-Day-атаки або нові вектори загроз. Це створює потребу у відкритих, добре документованих, оновлюваних та достовірних датасетах, які дозволять формувати стійкі до змін моделі нового покоління NIDS. Таким чином, створення авторських датасетів, що враховують недоліки існуючих рішень, є актуальним завданням дослідників у сфері мережевої безпеки.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є пошук можливості створення якісного, достовірного та репрезентативного набору мережевих даних, а також визначення універсальної методології, яка дозволяє генерувати сучасні датасети за умов обмежених обчислювальних ресурсів. Отриманий в результаті проведених експериментів датасет покликан усунути недоліки наявних рішень та сприяти розвитку інноваційних підходів до побудови NIDS, заснованих на методах глибокого навчання.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розробка якісного та репрезентативного набору даних для навчання NIDS вимагає ретельного планування як інфраструктури, так і процесів збору та обробки інформації. Далі описано запропоновану методологію побудови датасету, яка базується на моделюванні реалістичного мережевого середовища, симуляції різних типів атак і генерації фонової активності звичайних користувачів.

Процес формування набору охоплює кілька ключових етапів: проєктування та налаштування мережевої топології, вибір інструментів для імітації атак і нормального трафіку, організацію збору мережевих потоків за допомогою *tshark*, а також обробку зібраних даних для подальшого виділення ознак потоків. Особливу увагу приділено оптимізації використання обчислювальних ресурсів без шкоди для якості даних, що дає змогу відтворювати сучасні загрози в контрольованому середовищі навіть за обмежених інфраструктурних можливостей.Запропонована методологія спрямована на забезпечення високої точності, актуальності та універсальності даних, необхідних для досліджень у сфері кібербезпеки. Загальна структура експериментального середовища схематично подана на рис. 1.

Короткий огляд кібератак

У межах експериментального дослідження було згенеровано як нормальний (benign), так і шкідливий мережевий трафік. Нормальний трафік не містить ознак атак чи аномалій і використовується як еталон для навчання

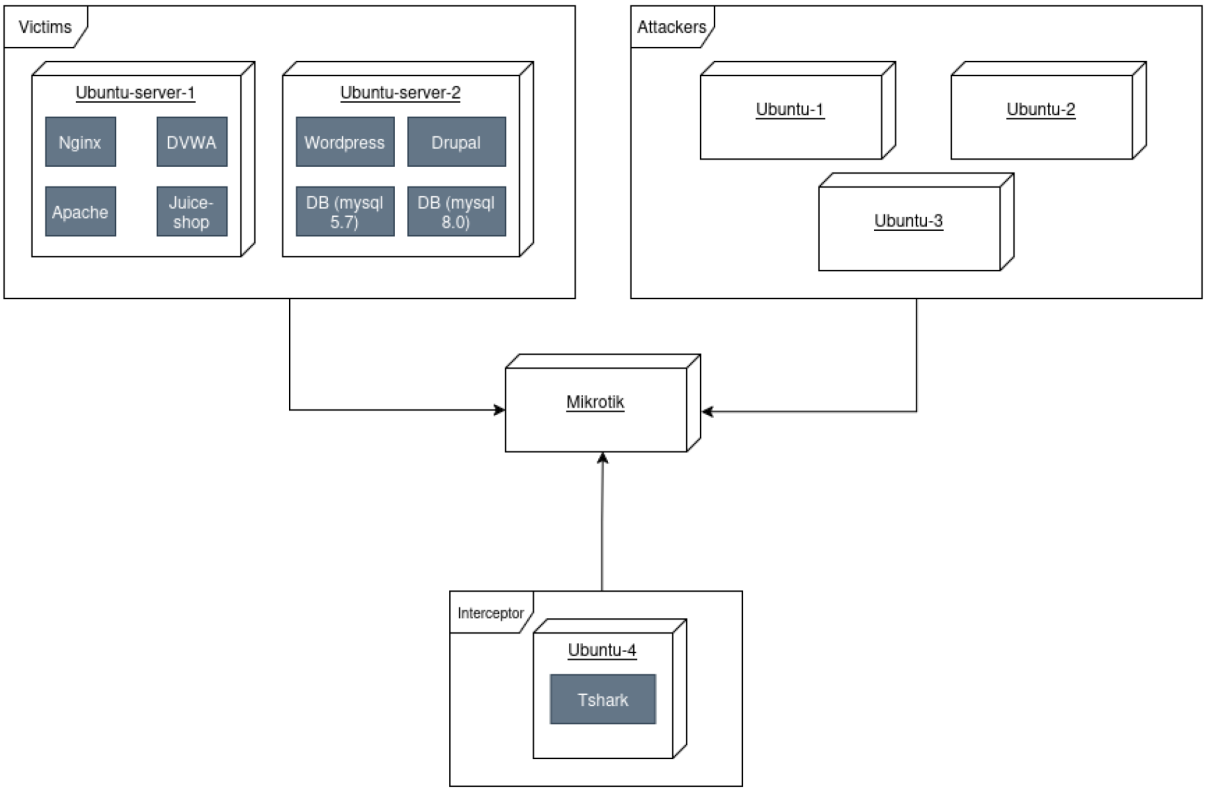


Рис. 1. Загальна інфраструктура експериментального середовища

та тестування NIDS. Шкідливий трафік охоплює кілька категорій атак, зокрема DoS/DDoS, розвідувальні (reconnaissance) та web-атаки.

До DoS-атак належать такі типи перевантаження систем: HTTP Flood, UDP Flood і UDP Fragmentation – атаки, спрямовані на виснаження ресурсів сервера шляхом надсилання великої кількості, іноді фрагментованих, пакетів. Атаки типу SYN Flood, TCP Flood, ACK Fragmentation і ICMP Flood порушують функціонування TCP/IP-стека, ускладнюючи встановлення з'єднань і обробку трафіку. Атаки Slowloris та Slow POST реалізують повільну передачу HTTP-запитів, блокуючи можливість обробки нових з'єднань.

Розвідувальні атаки, такі як: Ping Sweep, OS Scan, Port Scan, Vulnerability Scan, Host Discovery спрямовані на збір інформації про мережеву інфраструктуру шляхом активного сканування IP-адрес, портів і операційних систем. Такі дії зазвичай передують складнішим етапам вторгнення.

Web-атаки включають SQL Injection і Command Injection – методи ін'єкції шкідливих команд у запити до вебдодатків з метою компрометації баз даних або серверів. Також реалізовано атаки через File Upload, Reverse Shell (backdoor malware) та Dictionary Brute Force – зокрема, спроби підбору облікових даних або встановлення прихованих каналів керування сервером. Наведені сценарії дають змогу всебічно оцінити здатність NIDS виявляти широкий спектр сучасних загроз.

Для подальшого дослідження було відібрано атаки на основі чотирьох ключових критеріїв: по-перше, забезпечено повне охоплення основних тактик із матриці MITRE ATT&CK, зокрема Denial of Service (T1498), Reconnaissance (TA0043), Execution через Command and Scripting Interpreter (T1059), а також Credential Access (Brute Force); по-друге, враховано наявність відповідних типів атак у популярних загальнодоступних NIDS-датасетах, таких як CIC-IDS2017 та UNSW-NB15; по-третє, обрані атаки характеризуються високою відтворюваністю в локальному середовищі, що підтверджено попередніми дослідженнями з відтворюваності кіберекспериментів; по-четверте, охоплено ключові класи загроз – Reconnaissance (Ping Sweep, Port Scan, OS Scan), Web-атаки (SQL Injection, XSS, CSRF, Command Injection) згідно з класифікацією OWASP Top 10, а також Dictionary Brute Force. Відбір атак базувався на їхній наявності у щорічних звітах CERT-IST, CERT-EU Threat Landscape Report та ANSSI Cyber Threat Overview, що підтверджує їхню практичну значущість і актуальність для оцінювання ефективності NIDS.

Опис розробленої інфраструктури

Розгорнута інфраструктура (рис. 1) складається з трьох основних компонентів: машини-атакуючі (**Attackers**), машин-цілей (**Victims**) та машини-перехоплювача (**Interceptor**). Кожен з елементів відіграє специфічну роль у генерації, прийомі та зборі мережевого трафіку, необхідного для формування якісного набору даних.

Машини-атакуючі (Attackers)

Основне призначення цих машин – генерація синтетичного атакувального трафіку. Було розгорнуто три машини з іменами ubuntu-1, ubuntu-2 та ubuntu-3. На кожній із них встановлено типовий набір інструментів для реалізації атак, зокрема: *iperf3*, *sqlmap*, *nmap*, *hydra*, *hping3*, *slowhttptest*, *fping*, *beef-xss*, *msfvenom*, а також Python-інтерпретатор із підтримкою виконання авторських скриптів.

Крім того, на кожній машині розміщено спеціалізовані Bash та Python скрипти, створені для автоматизованого проведення атак та генерації трафіку. Зокрема, використані такі скрипти:

- Benign.sh – генерація нормального фонового трафіку,
- Bruteforce.sh – атаки типу Brute Force,
- DDoS.sh / DoS.sh – атаки на відмову в обслуговуванні,
- Slowloris.py – повільні HTTP-атаки,
- Spoofing.sh – атаки з підробкою IP-адрес,
- Web.sh – атаки на веб-додатки.

Кожен скрипт містить попереднє налаштування середовища, перевірку наявності залежностей та запуск відповідної атаки.

Машини-цілі (Victims)

Машини цього класу призначені для розгортання вразливих веб-додатків та прийому трафіку від машин-жертв. Було використано дві машини: ubuntu-server-1 та ubuntu-server-2. На обох серверах додатки розгорнуто із використанням контейнеризації через технологію Docker.

На ubuntu-server-1 запущено:

- веб-сервери nginx та apache,
- навчальні уразливі веб-додатки DVWA (Damn Vulnerable Web Application) та OWASP Juice Shop.

На ubuntu-server-2 розгорнуто:

- CMS-додатки WordPress та Drupal,
- дві версії СУБД MySQL: 5.7 та 8.0.

Процес розгортання автоматизовано за допомогою Bash-скриптів setup_server_1.sh та setup_server_2.sh, які виконують:

1. Встановлення Docker (якщо він відсутній),
2. Створення конфігураційного файлу docker-compose.yml,
3. Ініціалізацію контейнерів за допомогою docker-compose up.

Машина-перехоплювач (Interceptor)

Ця машина виконує функцію моніторингу та перехоплення мережевого трафіку, що передається між машинами-жертвами та цілями. На машині встановлено лише інструмент **tshark**, за допомогою якого весь трафік записується у форматі *.pcap*. Для кожного експериментального запуску атаки генерується окремий файл, що забезпечує точну відповідність між типом трафіку та збереженим мережевим знімком.

Таблиця 1

Конфігурації обчислювальних машин, задіяних в експериментальній інфраструктурі

Назва машини	Характеристики
Attackers	
ubuntu-1	Операційна система: Ubuntu 24.04, intel core i3-9100F 3.60GHz, ОЗУ: 16 ГБ
ubuntu-2	Операційна система: Ubuntu 24.04, intel core i3-6100, 3.70GHz, ОЗУ: 8 ГБ
ubuntu-3	Операційна система: Ubuntu 24.04, intel core i3-7100, 3.90GHz, ОЗУ: 8 ГБ
Victims	
ubuntu-server-1	Операційна система: Ubuntu-server 24.04, intel core i3-9100F 3.60GHz, ОЗУ: 16 ГБ
ubuntu-server-2	Операційна система: Ubuntu-server 24.04, intel core i3-9100F 3.60GHz, ОЗУ: 16 ГБ
Interceptor	
ubuntu-4	Операційна система: Ubuntu 24.04, intel core i3-4150, 3.50GHz, ОЗУ: 12 ГБ

Також не менш важливою частиною експериментального середовища є використання мережевого обладнання, що забезпечує фізичне та логічне з'єднання між усіма компонентами інфраструктури. Експеримент проводився у локальній мережі організації, тому особливу увагу приділено питанню ізоляції середовища для запобігання поширенню атак за межі тестового стенду.

Для побудови мережі використано маршрутизатор MikroTik Cloud Router Switch CRS326-24G-2S+RM, налаштований у режимі маршрутизатора з підтримкою VLAN. Створено три логічно ізольовані підмережі:

- **VLAN10** – для машин-атакуючих (192.168.10.0/24)
- **VLAN20** – для машин-жертв (192.168.20.0/24)

- **VLAN30** – для сервера перехоплення трафіку (192.168.30.0/24)

Порти маршрутизатора налаштовано з відповідними PVID для автоматичного призначення VLAN-тегів вхідному трафіку. Для кожної VLAN було піднято DHCP-сервер, який автоматично призначає IP-адреси відповідним пристроям. Додатково на маршрутизаторі активовано packet sniffing – передачу копій мережевого трафіку на віддалений сервер через протокол стрімінгу для його подальшого аналізу.

Підключення до віртуального стенду здійснювалося окремим ноутбуком через SSH, що дозволяло керувати експериментом без загрози проникнення атак до основної мережі університету. Ізоляція досягалася як фізичним від'єднанням, так і логічною сегментацією через VLAN. Побудовану інфраструктуру наведено на рис. 2.

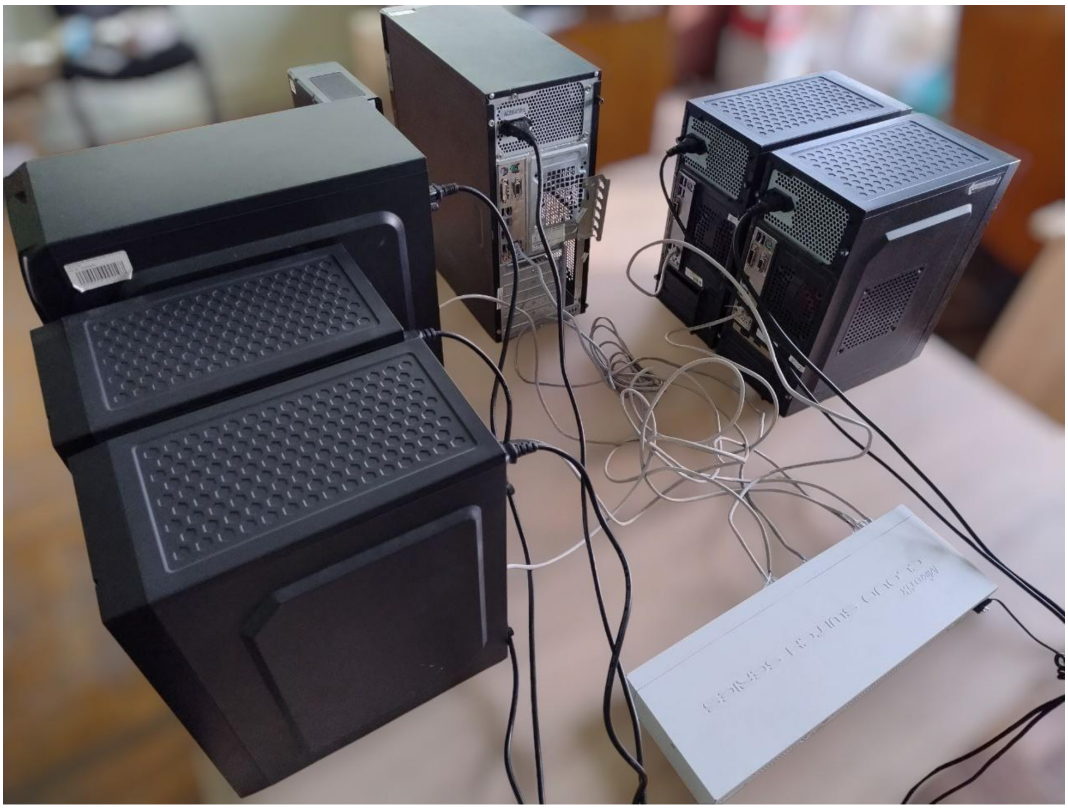


Рис. 2. Фото інфраструктури експериментального середовища

Проведення експериментів

Після налаштування інфраструктури та встановлення всіх необхідних залежностей здійснено серію експериментів з генерації атакуючого та легітимного мережевого трафіку. На кожній з атакуючих машин (ubuntu-1, ubuntu-2, ubuntu-3) були заздалегідь підготовлені bash-скрипти, що автоматизували запуск конкретних атак, включно з попереднім встановленням необхідних бібліотек та запуском відповідних інструментів.

Керування запуском сценаріїв здійснювалося централізовано – з окремої машини-оператора через SSH-з'єднання. Це дозволяло віддалено ініціювати атаки в контрольованій послідовності та синхронізовано керувати експериментальним процесом.

Тривалість кожного експерименту становила орієнтовно 30–60 хвилин, що забезпечувало достатній обсяг даних для статистичного аналізу та подальшої генерації ознак (features) на основі мережевих потоків. Перелік реалізованих атак разом із відповідними обсягами згенерованого мережевого трафіку, що були використані для формування дослідного набору даних, представлено в таблиці 2.

Порядок проведення експериментальних досліджень структуровано відповідно до категорій атак і наведено в таблиці 3.

Під час проведення кожного експерименту мережевий трафік записувався у форматі.pcap за допомогою інструмента **tshark**, що дозволило надалі здійснити глибокий аналіз потоків і виконати екстракцію ключових ознак для побудови моделей NIDS. Таким чином сформовано.pcap-файли, які чітко відповідали кожному типу атаки.

Для забезпечення відповідності структури трафіку характеристикам набору **CIC-IDS-2018** було використано інструмент **CICFlowMeter**, який дозволяє формувати *traffic flow* кожної сесії. Далі, за допомогою мови програмування **Python**, було здійснено попередню обробку, маркування даних відповідно до типів атак, а також об'єднання

Таблиця 2

Перелік атак та обсяг згенерованого мережевого трафіку

Type	Attack	Rows
Benign	Normal traffic	1008224
DDoS	HTTP Flood	90583
	UDP Flood	37632
	UDP Fragmentation	40142
	SYN Flood	38487
	ICMP Flood	35932
	ACK Fragmentation	39698
	TCP Flood	40165
	Slowloris	8725
DoS	UDP Flood	9878
	HTTP Flood	220233
	SYN Flood	122936
	Slow POST	141910
Reconnaissance	Ping Sweep	6894
	OS Scan	
	Vulnerability Scan	
	Port Scan	
	Host Discovery	
Web	Sql injection	47335
	Command injection	7658
	Backdoor malware (Reverse Shell)	14986
	File upload	14365
	XSS	15237
	Browser hijacking	14834
	CSRF	12637
Brute-force	Dictionary Brute force (Web)	3620

Таблиця 3

Параметри експериментальних атак

№	Тип атаки	Підтип атаки	Машини-атакуючі	Цільові IP та порти	Інструменти
1	Benign	–	ubuntu-1,2,3	192.168.30.251, 192.168.30.253,	Locust, selenium, iperf3
2	DoS	UDP Flood	ubuntu-1,2,3	192.168.30.251:8081, 8082; 192.168.30.253:8081	hping3
3	DoS	SYN Flood	ubuntu-1,2,3	192.168.30.251:8081, 8082; 192.168.30.253:8085	hping3
4	DoS	ICMP Flood	ubuntu-1,2,3	192.168.30.251:8081, 8082; 192.168.30.253:8082	hping3
5	DoS	HTTP DoS	ubuntu-1,2,3	192.168.30.251:8081, 8082; 192.168.30.253:8083	slowhttptest
5	DoS	SlowHTTPTest	ubuntu-1,2,3	192.168.30.251:8081, 8082; 192.168.30.253:8085	slowhttptest
6	DDoS	UDP Flood	ubuntu-1,2,3	192.168.30.251:8081	hping3
7	DDoS	SYN Flood	ubuntu-1,2,3	192.168.30.251:8082	hping3
8	DDoS	ICMP Flood	ubuntu-1,2,3	192.168.30.253:8085	hping3
9	DDoS	Slowloris	ubuntu-1,2,3	192.168.30.253:8081	python
10	DDoS	HTTP Flood	ubuntu-1,2,3	192.168.30.253:8082	slowhttptest
11	DDoS	ACK Fragmentation	ubuntu-1,2,3	192.168.30.253:8082	hping3
12	DDoS	UDP Fragmentation	ubuntu-1,2,3	192.168.30.253:8083	hping3
13	Reconnaissance	Ping Sweep	ubuntu-1,2,3	192.168.30.251:8081	fping
14	Reconnaissance	OS Scan	ubuntu-1,2,3	192.168.30.251:8081	nmap
15	Reconnaissance	Vulnerability Scan	ubuntu-3	192.168.30.253:8085	nmap
16	Reconnaissance	Port Scan	ubuntu-3	192.168.30.251:8082	nmap
17	Reconnaissance	Host Discovery	ubuntu-3	192.168.30.253:8082	nmap
18	Web Attack	SQL Injection	ubuntu-1,2,3	192.168.30.251:8081 192.168.30.253:8082	sqlmap
19	Web Attack	Command Injection	ubuntu-1,2,3	192.168.30.251:8081 192.168.30.253:8082	bash
20	Web Attack	Backdoor Malware	ubuntu-1,2,3	192.168.30.251:8081 192.168.30.253:8082	msfvenom
21	Web Attack	File Upload Attack	ubuntu-1,2,3	192.168.30.251:8081 192.168.30.253:8082	bash
22	Web Attack	XSS	ubuntu-1,2,3	192.168.30.251:8081 192.168.30.253:8082	bash
23	Web Attack	Browser Hijacking	ubuntu-1,2,3	192.168.30.251:8081 192.168.30.253:8082	beef-xss
24	Web Attack	CSRF	ubuntu-1,2,3	192.168.30.251:8081 192.168.30.253:8082	python
25	Brute Force	Bruteforce (Web)	ubuntu-1	192.168.10.254	hydra

результатів у два окремі файли: attack.csv та benign.csv. Файл attack.csv містить 21 клас, оскільки види атак типу «Reconnaissance» об'єднані в один клас через обмежену кількість згенерованого трафіку.

Ці набори даних використовувались для донавчання авторської моделі [10]. Для оцінювання ефективності моделі застосовано класичні метрики якості класифікації: **accuracy**, **precision**, **recall**, **F1-score** та **FPR** (*False Positive Rate*).

Точне налаштування (fine tuning) моделі

Авторську модель [20] попередньо навчено на відібраних ознаках з набору даних CIC-IDS-2018, після чого збережено у форматі.keras. Наступним етапом стала підготовка власного набору даних для донавчання цієї моделі з метою адаптації до нових умов та розширення простору ознак.

На етапі попередньої обробки даних проводиться очищення пропущених та некоректних значень. Нескінченні значення (inf, -inf) замінюються на NaN, після чого відсутні дані або заповнюються середніми значеннями по відповідних стовпцях, або видаляються – залежно від контексту. Строкові стовпці (за винятком цільової змінної Label) перетворюються на числові представлення, при цьому помилкові рядки також трансформуються у NaN з подальшим очищенням.

Далі застосовується нормалізація числових ознак методом Min-Max масштабування, що дозволяє привести значення до єдиного діапазону. Класові мітки у стовпці Label кодуються у числову форму за допомогою LabelEncoder. Після завершення етапу попередньої обробки дані поділяються на вхідні ознаки (features) та цільову змінну (target).

Подальше точне налаштування (fine-tuning), або ж трансферне навчання (transfer learning), базується на використанні попередньо натренованої моделі як основи для розв'язання нової, близької задачі [21]. Це дозволяє скористатися вже вивченими абстракціями, мінімізуючи обчислювальні витрати на повторне навчання з нуля.

Для реалізації цього підходу завантажено збережену модель, у якій всі шари, за винятком двох останніх (Dropout та Dense), заморожено тобто їх ваги не змінюються в процесі донавчання. На основі виходу передостаннього шару сформованоновий вихідний шар типу Dense, кількість нейронів у якому відповідає кількості класів нового набору (21 клас).

Нову модель побудовано з тими самими вхідними параметрами, але з оновленою структурою виходу. Для навчання модель компілюється з оптимізатором Adam, функцією втрат categorical_crossentropy та метриками оцінювання accuracy і AUC. Це дозволило ефективно провести донавчання моделі на новому датасеті, адаптувавши її до особливостей нових атак і специфіки трафіку, зібраного в межах запропонованої інфраструктури. Отримані показники наведено у таблиці 4.

Таблиця 4

Порівняння показників моделі до та після донавчання

Метрика	Optimized CNN-BiGRU-Attention [20]	Дотренована CNN-BiGRU-Attention
Accuracy (%)	99.41	99.44
Precision (%)	99.45	99.47
Recall (%)	99.41	99.44
F1-score (%)	99.42	99.45
FPR	0,0035	0,0033

Для порівняння використано тренувальні підмножини даних. Як видно з таблиці 4, донавчання моделі на запропонованому датасеті забезпечило певне покращення показників її ефективності. Це свідчить про наявність у сформованому наборі даних, попри його обмежений обсяг, релевантної інформації, здатної адаптувати модель до нових ознак і умов функціонування. Водночас помірний характер покращень вказує на те, що зібраного трафіку недостатньо для суттєвого підвищення якості класифікації. Проте навіть такі результати підтверджують перспективність обраного підходу: за умов обмежених обчислювальних ресурсів можливо сформувати повноцінний датасет, придатний для донавчання моделей NIDS. Основною метою цього дослідження було формування методології, що забезпечує ефективне генерування навчальних даних для систем виявлення мережевих вторгнень у локальному середовищі. Попри те, що створений набір даних наразі поступається за масштабом і різноманіттям широко визнаним публічним датасетам, таким як CIC-IDS2017 та UNSW-NB15, він має потенціал до подальшого розвитку. Зокрема, майбутнє масштабування експериментів із розширенням кількості вузлів, типів атак і сценаріїв функціонування мережі може сприяти створенню повноцінного сучасного датасету, релевантного до умов реального середовища інформаційної безпеки.

Висновки

Досліджено широкий спектр сучасних типів кібератак, розроблено компактну експериментальну інфраструктуру для їх реалізації в ізольованому контрольованому середовищі, а також здійснено збір мережевого трафіку для створення власного набору даних. Основною метою дослідження було формування методології, яка дозволяє з використанням обмежених обчислювальних ресурсів генерувати навчальні дані для тренування моделей глибокого навчання, що застосовуються в NIDS.

Серед ключових досягнень даного дослідження доцільно виокремити розгортання модульної експериментальної інфраструктури, що забезпечує централізоване управління процесами ініціювання атак і збору трафіку; генерацію релевантного мережевого трафіку із застосуванням широкого спектру інструментів, зокрема *hping3*, *nmap*, *sqlmap*, *slowhttptest* та інших; екстракцію ознак трафіку за допомогою *CICFlowMeter* з подальшим формуванням структурованого датасету, придатного для використання у задачах машинного навчання; а також успішне донавчання попередньо натренованої моделі на зібраних даних, що забезпечило позитивну, хоча й помірну динаміку основних метрик якості класифікації.

Попри позитивні результати, отримані в ході експериментів, існують певні обмеження. Зокрема, обмежена кількість нових класів атак, обсяг зібраного трафіку, а також невисока варіативність мережевого середовища можуть стримувати потенціал моделі до генералізації.

У подальших дослідженнях планується масштабувати експериментальне середовище до рівня розподіленої мережевої інфраструктури, зокрема з використанням декількох логічно об'єднаних підмереж (наприклад, різні VLAN-и чи сегменти університетської мережі), збільшити кількість цільових вузлів і атакуючих машин, що дозволить згенерувати більший обсяг трафіку з більшою різноманітністю, інтегрувати нові типи атак, включаючи сучасні приклади з області AI-driven атак, атак на IoT-пристрої, fileless-malware, багатовекторні DDoS-атаки, автоматизувати процес генерації, збереження та розмітки трафіку з метою пришвидшення збору та обробки нових наборів даних.

Розроблена методологія може стати основою для побудови повноцінної платформи тестування та навчання моделей виявлення вторгнень у реалістичних умовах, що відповідають сучасним вітчизняним викликам у сфері кібербезпеки.

Список використаної літератури

1. Molina-Coronado B., Rosero-Montalvo P. D., Calafate C. T. Survey of Network Intrusion Detection Methods From the Perspective of the Knowledge Discovery in Databases Process // *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2020. Vol. 17, no. 4. P. 2451–2479. DOI: https://doi.org/10.1109/tnsm.2020.3016246 (дата звернення: 08.06.2025).

2. Jo M., Jeong H., Song B., Jo H. Encrypted Traffic Decryption Tools: Comparative Performance Analysis and Improvement Guidelines // Electronics. 2024. Vol. 13, no. 14. P. 2876. URL: https://doi.org/10.3390/electronics13142876 (дата звернення: 08.06.2025).

3. CICFlowMeter (formerly ISCXFlowMeter) [Електронний ресурс]. URL: https://www.unb.ca/cic/research/applications.html (дата звернення: 08.06.2025).

4. *SQLMap* [Електронний ресурс]. URL: https://sqlmap.org/ (дата звернення: 08.06.2025).

5. Lyon G. *Nmap Security Scanner* [Електронний ресурс]. URL: http://nmap.org/ (дата звернення: 08.06.2025).

6. Maciejak D. *Hydra* [Електронний ресурс]. URL: https://github.com/vanhauser-thc/thc-hydra (дата звернення: 08.06.2025).

7. Kali Tools. *hping3 Package Description* [Електронний ресурс]. URL: https://www.kali.org/tools/hping3 (дата звернення: 08.06.2025).

8. Kali Tools. *Slowhttptest Usage Example* [Електронний ресурс]. URL: https://www.kali.org/tools/slowhttptest/ (дата звернення: 08.06.2025).

9. *Fping* [Електронний ресурс]. URL: https://fping.org/ (дата звернення: 08.06.2025).

10. *The Browser Exploitation Framework (BeEF)* [Електронний ресурс]. URL: https://beefproject.com (дата звернення: 08.06.2025).

11. Rapid7. *Introducing msfvenom* [Електронний ресурс]. URL: https://www.rapid7.com/blog/post/2011/05/24/introducing-msfvenom/ (дата звернення: 08.06.2025).

12. Velarde-Alvarado P., Coronado E. V., Ponce H. et al. A Novel Framework for Generating Personalized Network Datasets for NIDS Based on Traffic Aggregation // *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 5. P. 1847. DOI: https://doi.org/10.3390/s22051847 (дата звернення: 08.06.2025).

13. Kim A., Park M., Lee D. H. AI-IDS: Application of Deep Learning to Real-Time Web Intrusion Detection // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 70245–70261. DOI: https://doi.org/10.1109/access.2020.2986882 (дата звернення: 08.06.2025).

14. Flood R., Shiaeles S., Kolokotronis N. et al. Bad Design Smells in Benchmark NIDS Datasets // *2024 IEEE 9th European Symposium on Security and Privacy (EuroS&P)*, Vienna, Austria, 8–12 July 2024. P. 658–675. DOI: https://doi.org/10.1109/eurosp60621.2024.00042 (дата звернення: 08.06.2025).

15. Neto E. C. P., Silva L. C., Rocha D. M. et al. CICIoT2023: A Real-Time Dataset and Benchmark for Large-Scale Attacks in IoT Environment // *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 13. P. 5941. DOI: https://doi.org/10.3390/s23135941 (дата звернення: 08.06.2025).

16. Guerra J. L., Catania C., Veas E. Datasets are not Enough: Challenges in Labeling Network Traffic // *Computers & Security*. 2022. P. 102810. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cose.2022.102810 (дата звернення: 08.06.2025).

17. Ferriyan A., Hermawan D., Suhartono D. Generating Network Intrusion Detection Dataset Based on Real and Encrypted Synthetic Attack Traffic // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 17. P. 7868. DOI: https://doi.org/10.3390/app11177868 (дата звернення: 08.06.2025).

18. Damasevicius R., Krilavicius T., Maskeliunas R. et al. LITNET-2020: An Annotated Real-World Network Flow Dataset for Network Intrusion Detection // *Electronics*. 2020. Vol. 9, no. 5. P. 800. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics9050800 (дата звернення: 08.06.2025).

19. Rahman S., Chowdhury M. J. M., Jahan I. et al. SYN-GAN: A robust intrusion detection system using GAN-based synthetic data for IoT security // *Internet of Things*. 2024. Vol. 26. P. 101212. DOI: https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101212 (дата звернення: 08.06.2025).

20. А. О. Нікітенко і Є. О. Башков. Оптимізація системи виявлення мережевих вторгнень на основі глибокого навчання із використанням методу зменшення розмірності та метаевристичних алгоритмів // *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2025. № 1. DOI: https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-1-86-98 (дата звернення: 08.06.2025).

21. Sanmorino A., Puspasari D. R., Wibowo A. Feature Extraction vs Fine-tuning for Cyber Intrusion Detection Model // *Jurnal INFOTEL*. 2024. Vol. 16, no. 2. P. 302–315. DOI: https://doi.org/10.20895/infotel.v16i2.996 (дата звернення: 08.06.2025).

References

1. Molina-Coronado, B., Mori, U., Mendiburu, A., & Miguel-Alonso, J. (2020). Survey of network intrusion detection methods from the perspective of the knowledge discovery in databases process. *IEEE Transactions on Network and Service Management, 17*(4), 2451–2479. https://doi.org/10.1109/TNSM.2020.301624

2. Jo, M., Jeong, H., Song, B., & Jo, H. (2024). Encrypted traffic decryption tools: Comparative performance analysis and improvement guidelines. *Electronics, 13*(14), 2876. https://doi.org/10.3390/electronics13142876

3. Canadian Institute for Cybersecurity. (n.d.). *CICFlowMeter (formerly ISCXFlowMeter)*. University of New Brunswick. https://www.unb.ca/cic/research/applications.htm

4. SQLMap. (n.d.). *sqlmap.org*. https://sqlmap.org/

5. Lyon, G. F. (n.d.). *Nmap security scanner*. https://nmap.org/

6. Maciejak, D. (n.d.). *Hydra*. https://github.com/vanhauser-thc/thc-hydra

7. Kali Linux Tools. (n.d.). *hping3 package description*. https://www.kali.org/tools/hping3/

8. Kali Linux Tools. (n.d.). *Slowhttptest usage example*. https://www.kali.org/tools/slowhttptest/

9. fping.org. (n.d.). *fping*. https://fping.org/

10. BEEF Project. (n.d.). *The Browser Exploitation Framework*. https://beefproject.com/

11. Rapid7. (2011, May 24). *Introducing msfvenom*. https://www.rapid7.com/blog/post/2011/05/24/introducing-msfvenom/

12. Velarde-Alvarado, P., Gonzalez, H., Martínez-Peláez, R., Mena, L. J., Ochoa-Brust, A., Moreno-García, E., Félix, V. G., & Ostos, R. (2022). A novel framework for generating personalized network datasets for NIDS based on traffic aggregation. *Sensors, 22*(5), 1847. https://doi.org/10.3390/s22051847

13. Kim, A., Park, M., & Lee, D. H. (2020). AI-IDS: Application of deep learning to real-time web intrusion detection. *IEEE Access, 8*, 70245–70261. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2986882

14. Flood, R., Engelen, G., Aspinall, D., & Desmet, L. (2024). Bad design smells in benchmark NIDS datasets. In *2024 IEEE 9th European Symposium on Security and Privacy (EuroS&P)* (pp. 658–675). IEEE. https://doi.org/10.1109/EuroSP60621.2024.00042

15. Neto, E. C. P., Dadkhah, S., Ferreira, R., Zohourian, A., Lu, R., & Ghorbani, A. A. (2023). CICIoT2023: A real-time dataset and benchmark for large-scale attacks in IoT environment. *Sensors, 23*(13), 5941. https://doi.org/10.3390/s23135941

16. Guerra, J. L., Catania, C., & Veas, E. (2022). Datasets are not enough: Challenges in labeling network traffic. *Computers & Security, 115*, 102810. https://doi.org/10.1016/j.cose.2022.102810

17. Ferriyan, A., Thamrin, A. H., Takeda, K., & Murai, J. (2021). Generating network intrusion detection dataset based on real and encrypted synthetic attack traffic. *Applied Sciences, 11*(17), 7868. https://doi.org/10.3390/app11177868

18. Damasevicius, R., Venckauskas, A., Grigaliunas, S., Toldinas, J., Morkevicius, N., Aleliunas, T., & Smuikys, P. (2020). LITNET-2020: An annotated real-world network flow dataset for network intrusion detection. *Electronics, 9*(5), 800. https://doi.org/10.3390/electronics9050800

19. Rahman, S., Pal, S., Mittal, S., Chawla, T., & Karmakar, C. (2024). SYN-GAN: A robust intrusion detection system using GAN-based synthetic data for IoT security. *Internet of Things, 26*, 101212. https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101212

20. Nikitenko, A., & Bashkov, Y. (2025). Optymizatsiia systemy vyiavlennia merezhevykh vtorhnen na osnovi hlybokoho navchannia iz vykorystanniam metodu zmenshennia rozmirnosti ta metaevrystychnoho alhorytmiv [In Ukrainian]. *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University, 1*, 86–98. https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-1-86-98

21. Sanmorino, A., Suryati, S., Gustriansyah, R., Puspasari, S., & Ariati, N. (2024). Feature extraction vs fine-tuning for cyber intrusion detection model. *JURNAL INFOTEL, 16*(2), 302–315. https://doi.org/10.20895/infotel.v16i2.996

УДК 004.8 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.31

В. К. ОБОДЯК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри кібербезпеки
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0002-8539-1252

М. С. ОТРОЩЕНКО
аспірант кафедри комп'ютерних наук
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0001-5064-6780

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНОГО МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

Стаття присвячена обґрунтуванню інноваційного підходу до автономної навігації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) на основі машинного навчання з використанням інформаційно-екстремального методу. Основна увага зосереджена на оптимізації параметрів машинного навчання для підвищення точності розпізнавання наземних об'єктів у геопросторовій сцені.

У дослідженні визначено оптимальні значення параметрів машинного навчання вектору, що дозволило побудувати геометричні контейнери класів розпізнавання та сформувати на їх основі ефективні вирішувальні правила. Функціональне тестування алгоритму підтвердило безпомилковість роботи системи за навчальною матрицею, а екзаменаційний етап продемонстрував високу точність машинного навчання автономного БПЛА.

Ключовим теоретичним результатом є обґрунтування задачі інформаційно-екстремального синтезу бортової системи безпілотного літального апарату, яка полягає у пошуку глобального максимуму інформаційного критерію для оптимізації параметрів навчання у різних зонах геопросторової сцени. Додатково запропоновано функціональну категорійну модель машинного навчання другого рівня глибини, що може значно підвищити якість розпізнавання в умовах динамічного середовища.

Запропоновано нову функціональну категорійну модель машинного навчання другого рівня глибини, що значно підвищує якість розпізнавання складних об'єктів у динамічних умовах. Ефективність моделі полягає у поєднанні інформаційно-екстремального методу з категорійною моделлю машинного навчання. Практична значимість отриманих результатів проявляється у можливості їх використання для розробки інтелектуальних систем управління БПЛА, обробки геопросторових даних та застосування у військовій, картографічній та моніторинговій сферах.

Робота відкриває нові перспективи для створення високоефективних автономних систем навігації, здатних функціонувати в реальному часі у умовах динамічного змінного середовища.

Ключові слова: *БПЛА, машинне навчання, інформаційно-екстремальний підхід, автономна навігація.*

V. K. OBODYAK
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Cybersecurity
Sumy State University
ORCID: 0000-0002-8539-1252

M. S. OTROSHCHENKO
Postgraduate Student at the Department of Computer Science
Sumy State University
ORCID: 0000-0001-5064-6780

OPTIMIZING INFORMATION-EXTREMAL MACHINE LEARNING PARAMETERS FOR GROUND OBJECT RECOGNITION BY UNMANNED AERIAL VEHICLES

The article is devoted to the justification of an innovative approach to autonomous navigation of unmanned aerial vehicles (UAVs) based on machine learning using the information-extreme method. The main focus is on optimizing machine learning parameters to increase the accuracy of recognition of ground objects in a geospatial scene.

The study determined the optimal values of the vector machine learning parameters, which allowed constructing geometric containers of recognition classes and forming effective decision rules based on them. Functional testing of the algorithm confirmed the accuracy of the system's operation based on the training matrix, and the examination stage demonstrated the high accuracy of machine learning of an autonomous UAV.

The key theoretical result is the justification of the information-extreme synthesis problem of the onboard system of an unmanned aerial vehicle, which consists in finding the global maximum of the information criterion for optimizing the training parameters in different zones of the geospatial scene. Additionally, a functional categorical machine learning model of the second level of depth is proposed, which can significantly improve the quality of recognition in a dynamic environment.

A new functional categorical machine learning model of the second level of depth is proposed, which significantly improves the quality of recognition of complex objects in dynamic conditions. The effectiveness of the model lies in the combination of the information-extreme method with the categorical machine learning model. The practical significance of the results obtained is manifested in the possibility of their use for the development of intelligent UAV control systems, geospatial data processing and application in the military, cartographic and monitoring spheres.

The work opens up new prospects for the creation of highly efficient autonomous navigation systems capable of operating in real time in a dynamic, changing environment.

Key words: *UAV, machine learning, information-extreme approach, autonomous navigation.*

Постановка проблеми

Сучасний розвиток технологій автономних БПЛА вимагає високої точності та надійності систем навігації, особливо в умовах динамічного та непередбачуваного середовища. Одним із ключових напрямків удосконалення бортових систем розпізнавання (БСР) є використання методів відео навігації, які дозволяють забезпечити автономне орієнтування БПЛА на основі аналізу візуальних даних. У цьому контексті важливим є вибір оптимального методу дослідження, який би враховував специфіку функціонування БПЛА та забезпечував високу ефективність прийняття рішень. За таким умов актуальним вбачається пошук та обґрунтування нових підходів та технологій до автономної навігації БПЛА на основі машинного навчання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд зазначеної проблематики свідчить про підвищений науковий інтерес з боку дослідників. Бадрінараянан, В., Кендалл, А., Чіполла, Р. [3], Чен, Л. К., Папандреу, Г., Коккінос, І., Мерфі, К., та Юйль, А. Л. [5], Роннебергер, О., Фішер, П., та Брокс, Т. [14], які присвятили власні дослідження розв'язанню проблеми забезпечення якості сегментації зображень за допомогою використання згорткової архітектури. Довбиш А. С., Будник М. М., П'ятаченко В. Ю., Мироненко М. І. [9], роботи яких присвячені інформаційно-екстремальному машинному навчанню бортової системи розпізнавання. Енгель, Дж., Колтун, В., Кремерс, Д. [6], Форстер, К., Піццолі, М., та Скарамуцца, Д. [6], Сінгх І. П., Патель А. [16], Скарамуцца, Д., Фраундорфер, Ф. [15], в роботах яких містяться ґрунтовні пропозиції щодо удосконалення візуальної одометрії в системах сучасної навігації.

Заслуговує на увагу підхід до вирішення проблеми виявлення та уникнення БПЛА, який запропонований в роботі Фазано, Джанкармін; Аккардо, Доменіко; Тіррі, Мочча, Антоніо та Етторе Де Лелліс [13].

Крім того, варто відмітити праці, присвячені дослідженню окремих питань навігації, таких вчених, як: Хуанг, Ґ. [8], Парк, Дж., та Лі, Х. [12].

Поряд із цим, як показав ґрунтовний аналіз окреслених праць, потреба в нових підходах до автономної навігації БПЛА на основі машинного навчання залишається актуальною та потребує негайного розв'язання.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є обґрунтування нового підходу до автономної навігації БПЛА на основі машинного навчання.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розглянемо в рамках IEI-технології формалізовану постановку задачі інформаційного синтезу здатної навчатися бортової системи автономного БПЛА для розпізнавання наземних об'єктів у геопросторовій сцені.

Нехай сформовано множину абеток $\{X_m^o(z) \mid m=\overline{1,M}; z=\overline{1,Z_{\max}}$ класів розпізнавання, які характеризують однакові M наземних об'єктів в різних зонах геопросторової сцени. Для кожного параметричного класу розпізнавання $X_m^o(z)$, де z – параметр, який визначає номер зони геопросторової сцени, побудовано чотирьох вимірну навчальну матрицю $\left\|y_{m,i}^{(j)}(z)\right\|$ яскравості пікселів рецепторного поля кадрів зображення регіону, в якій рядок $\{y_{m,i}^{(j)}(z) \mid i=\overline{1,N}\}$, де N – кількість ознак розпізнавання, є реалізацією відповідного параметричного класу розпізнавання $X_m^o(z)$, а стовпчик матриці – випадкова навчальна вибірка $\{y_{m,i}^{(j)}(z) \mid j=\overline{1,N}\}$, яка складається з n випадкових значень i-ї ознаки класу розпізнавання $X_m^o(z)$.

У бінарному просторі ознак Геммінга для заданого рівня глибини інформаційно-екстремального машинного навчання задано вектор-кортеж $\{g_m(z)\}$ параметрів машинного навчання, які впливають на його точність. У загальному випадку структура вектору параметрів машинного навчання бортової системи розпізнавання (БСР) для заданої абетки класів розпізнавання $\{X_m^o(z)\}$ має вигляд

$$g_m(z) = \langle g_{m,1}(z), \ldots, g_{m,\xi}(z), \ldots, g_{m,\Xi}(z) \rangle. \quad (1)$$

Водночас задано обмеження на відповідні параметри машинного навчання:

$$\mathrm{Rm}(g_{m,1}(z), \ldots, g_{m,\xi}(z), \ldots, g_{m,\Xi}(z)) \le 0.$$

У процесі інформаційно-екстремального машинного навчання автономного БПЛА необхідно:

1) Визначити для заданого рівня глибини ξ оптимальні значення параметрів машинного навчання вектору, які забезпечують максимальне значення усередненого за абеткою класів розпізнання інформаційного критерію, обчислене в робочій (допустимій) області визначення його функції:

$$\overline{E}^{*}(z) = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} \max_{G_E \cap G_d} E_m^{(z)}(d), \tag{2}$$

де $E_m^{(z)}(d)$ – інформаційний критерій оптимізації параметрів машинного навчання, обчислений при поточному значення радіусу гіперсферичного контейнера параметричного класу розпізнавання $X_m^o(z)$; ; G_E – робоча область визначення інформаційного критерію оптимізації параметрів машинного навчання; G_d – область допустимих значень радіусів контейнерів класів розпізнавання;

2) За визначеними на етапі машинного навчання оптимальними геометричними параметрами контейнерів класів розпізнавання побудувати вирішувальні правила;

3) У режимі функціонального тестування алгоритму інформаційно-екстремального машинного навчання автономного БПЛА перевірити безпомилковість за навчальною матрицею вирішувальних правил, побудованих за отриманими в процесі машинного навчання геометричними параметрами контейнерів класів розпізнавання;

4) На етапі екзамену перевірити точність машинного навчання автономного БПЛА і при необхідності збільшити глибину машинного навчання шляхом оптимізації інших параметрів функціонування системи, включаючи параметри формування вхідного математичного опису.

Таким чином, задача інформаційно-екстремального синтезу бортової системи автономного БПЛА для розпізнавання наземних об'єктів у геопросторовій сцені полягає в оптимізації параметрів машинного навчання (1) класів розпізнавання в різних зонах геопросторової сцени шляхом пошуку глобального максимуму інформаційного критерію (2).

Обов'язковою умовою для визначення координат місцезнаходження автономного БПЛА є наявність правил прийняття рішень на основі результатів машинного навчання БСР наземних цілей, обраних під час планування місії автономного БПЛА; для визначення місцезнаходження БПЛА необхідно визначити його відстань до виявлених наземних цілей. Традиційним непрямим методом визначення відстані є вимірювання кутів пеленгу до навігаційних маяків на відомій висоті БПЛА. Однак використання бортового радіопеленгатора не забезпечує інформаційну безпеку БПЛА через вплив засобів радіоелектронної боротьби. Більш перспективним є використання лазерного далекоміра (лідара), який дозволяє з точністю до одного метра визначати відстань до наземного об'єкта, що знаходиться на відстані 1000 метрів від БПЛА [11].

У рамках ІЕІ-технології розглянемо задачу інформаційно-екстремального машинного навчання з оптимізацією контрольних допусків на ознаки параметричних класів розпізнавання.

Нехай для розпізнавання реалізацій, наприклад, параметричного класу розпізнавання $X_m^o(z)$ задано вектор параметрів машинного навчання автономного БПЛА для розпізнавання наземних об'єктів у геопросторовій сцені:

$$g_m(z) = \langle x_m(z), d_m(z), \delta(z) \rangle, \tag{3}$$

де $x_m(z)$ – усереднений за реалізаціями двійковий вектор ознак, вершина якого визначає центр гіперсферичного контейнера класу розпізнавання $X_m^o(z)$; $d_m(z)$ – радіус гіперсферичного контейнера класу розпізнавання $X_m^o(z)$, який відновлюється в радіальному базисі простору ознак розпізнавання; $\delta(z)$ – параметр, величина якого дорівнює половині симетричного поля контрольних допусків для всіх ознак розпізнавання.

Згідно з працею [9] параметр $\delta(z)$ дорівнює половині симетричного поля контрольних допусків *i*-ї ознаки розпізнавання (рис. 1).

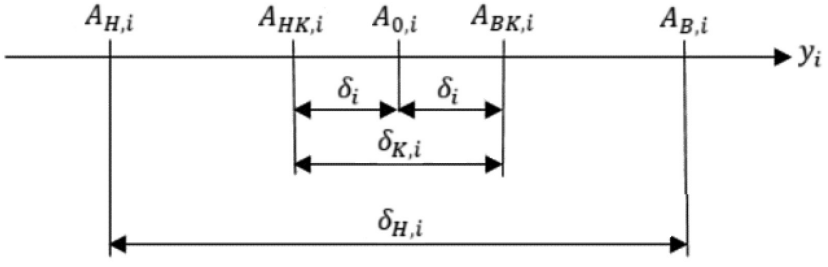


Рис. 1. Поля допусків на ознаку розпізнавання

На рисунку 1 прийнято такі позначення: $A_{0,i}$ – номінальне значення ознаки y_i; $A_{H,i}$ – нижній нормований (експлуатаційний) допуск; $A_{b,i}$– верхній нормований допуск; $A_{HK,i}$ – нижній контрольний допуск; $A_{BK,i}$ – верхній контрольний допуск; $\delta_{K,i}$ – поле контрольних допусків; $\delta_{H,i}$ – поле нормованих допусків, δ_i – параметр, який дорівнює половині симетричного двобічного поля контрольних допусків *i*-ї ознаки розпізнавання.

Область значень параметра $\delta(z)$ задається нерівністю

$$\delta(z) < \delta_H(z)/2,$$

де $\delta_H(z)$ – мінімальне нормоване поле допусків на ознаки розпізнавання, яке задає область значень параметра $\delta(z)$.

Область значень радіуса контейнера параметричного класу розпізнавання $X_m^o(z)$ задається нерівністю

$$d_m(z) < d[x_m(z) \oplus x_c(z)],$$

де $d(x_m \oplus x_c)$ – міжцентрова відстань між класом розпізнавання $X_m^o(z)$ і його найближчим сусідом $X_c^o(z)$, яка визначається як кодова відстань між відповідними усередненими векторами ознак розпізнавання $x_m(z)$ і $x_c(z)$.

Таким чином, вектор задає третій рівень глибини машинного навчання, оскільки оптимізуються на першому рівні глибини два геометричні параметри: усереднений вектор ознак розпізнавання $x_m(z)$ і радіус $d_m(z)$ гіперсферичного контейнера класу розпізнавання X_m^o; на другому рівні – параметр δ.

Необхідно визначити для заданого рівня глибини оптимальні значення параметрів машинного навчання вектору, які забезпечують максимальне значення усередненого за абеткою класів розпізнання інформаційного критерію, обчислене в робочій (допустимій) області визначення його функції.

У рамках IEI-технології реалізація алгоритмічного забезпечення починається із розроблення категорійної функціональної моделі інформаційно-екстремального машинного навчання заданого рівня глибини.

Вхідний математичний опис автономної БСР функціональної категорійної моделі представимо у вигляді, аналогічному структурі:

$$I_{вх} = \langle W, T, \Omega, Z, X, \{Y^{|M|}(z)\}, \{X^{|M|}(z)\}; f_1, f_2\rangle, \tag{3}$$

де $\{Y^{|M|})(z)\}$ – вхідна навчальна матриця M параметричних класів розпізнавання; $\{X^{|M|}(z)\}$ – робоча бінарна навчальна матриця M параметричних класів розпізнавання, задана в Геммінговому просторі ознак розпізнавання.

На рисунку 2 показано функціональну категорійну модель інформаційно-екстремального машинного навчання за алгоритмом другого рівня глибини для розпізнавання наземних об'єктів у геопросторовій сцені з паралельною оптимізацією контрольних допусків на ознаки розпізнавання. На першому рівні здійснюється оптимізація геометричних параметрів контейнерів класів розпізнавання, на другому – оптимізація контрольних допусків на ознаки розпізнавання.

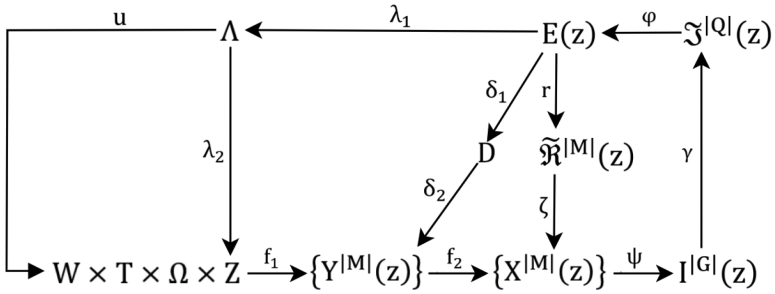


Рис. 2. Функціональна категорійна модель машинного навчання другого рівня глибини для розпізнавання наземних об'єктів у геопросторвій сцені

На рисунку 2 терм-множина E значень інформаційного критерію є загальною для всіх контурів оптимізації параметрів машинного навчання, заданих вектором (3). Оператор $r: E \to \tilde{\Re}^{|M|}(z)$ будує на кожному кроці машинного навчання у загальному випадку апріорно нечітке покриття $\tilde{\Re}^{|M|}(z)$, яке відображається оператором ζ на розподіл $\{X^{|M|}(z)\}$ двійкових векторів ознак розпізнавання. Далі оператор ψ: $X^{|M|}(z) \to I^{|G|}(z)$, де $I^{|G|}(z)$ – множина G гіпотез перевіряє основну статистичну гіпотезу $\gamma_1 : x_{m,i}^{(j)} \in X_m^o$. Оператор γ формує множину $\mathfrak{I}^{|Q|}(z)$ точнісних характеристик класифікаційних рішень, де $Q = G^2$, а оператор ϕ обчислює множину значень E інформаційного критерію оптимізації як функціонала від точнісних характеристик. Контур оптимізації контрольних допусків на ознаки розпізнавання замикається через терм-множину D, елементами якої є значення системи контрольних допусків на ознаки розпізнавання. У цьому контурі оператор δ_1 на кожному кроці машинного навчання задає з терм-множини D нове значення параметра δ_1 поля контрольних допусків, який оптимізується в процесі машинного навчання за паралельним алгоритмом. Оператор δ_2 обчислює на кожному кроці машинного навчання нові

контрольні допуски для всіх ознак розпізнавання. Оператор λ_1 запускає лічильник Λ зон геопросторової сцени, а оператор λ_2 обирає набір зображень наземних об'єктів, розташованих у відповідній зоні геопросторової сцени, які відображаються на горизонтальному моніторі багатофункціонального стенду-симулятора динамічного оточення для формування вхідної навчальної матриці $Y^{|M|}(z)$. Процес машинного навчання регламентується оператором u.

Перевагою інформаційно-екстремального машинного навчання порівняно зі згортковими штучними нейронними мережами (ШНМ) є на порядок менший розмір вибірки наземних опорних зображень, що значно зменшує матеріальні та часові витрати машинного навчання. Правила прийняття рішень, засновані на результатах інформаційно-екстремального машинного навчання, характеризувалися високою точністю та ефективністю класифікаційних рішень. При цьому для генерації вхідної інформації використовувався багатофункціональний симулятор динамічного середовища, що значно зменшує матеріальні та часові витрати машинного навчання БПЛА.

У зв'язку зі складністю й ресурсомісткістю проведення натурних експериментів з використанням реальних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в умовах динамічного геопросторового середовища, на початковому етапі дослідження було зосереджено увагу на теоретичному моделюванні та математичному обґрунтуванні запропонованого підходу.

Висновки

Таким чином, показана на рисунку 2 функціональна категорійна модель представляє узагальнену структурну схему базового двох циклічного алгоритму інформаційно-екстремального машинного навчання з оптимізацією радіусів гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання і контрольних допусків на ознаки розпізнавання. Реалізація цього алгоритму дозволяє на кожному кроці машинного навчання трансформувати вхідну навчальну матрицю в задану у просторі Геммінга робочу бінарну навчальну матрицю, яка в процесі інформаційно-екстремального машинного навчання адаптується до його максимальної точності, під якою розуміється середня повна ймовірність прийняття правильних класифікаційних рішень для заданої абетки класів розпізнавання.

Запропонована модель інформаційно-екстремального машинного навчання дозволяє формалізовано представити процес оптимізації параметрів розпізнавання, що є передумовою для подальшої розробки та практичної реалізації.

Отримані результати можуть бути інтегровані в програмне забезпечення симуляторів та використані для подальшої валідації на стендових або польових випробуваннях.

Список використаної літератури

1. Afghah F., Razi A., Chakareski J., Ashdown J. Wildfire Monitoring in Remote Areas using Autonomous Unmanned Aerial Vehicles // *arXiv preprint*. 2019. № arXiv:1905.00492. URL: https://arxiv.org/abs/1905.00492

2. An Onboard Vision-Based System for Autonomous Landing of a Low-Cost Quadrotor on a Novel Landing Pad / Liu et al. *Sensors*. 2019. Vol. 19, no. 21. P. 4703. URL: https://doi.org/10.3390/s19214703

3. Badrinarayanan V., Kendall A., Cipolla R. SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2017. Vol. 39, no. 12. P. 2481–2495. URL: https://doi.org/10.1109/tpami.2016.2644615

4. Current status and perspective of remote sensing application in crop management / M. Jurišić et al. *Journal of Central European Agriculture*. 2021. Vol. 22, no. 1. P. 156–166. URL: :10.5513/JCEA01/22.1.3042

5. DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs / L.-C. Chen et al. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2018. Vol. 40, no. 4. P. 834–848. URL: https://doi.org/10.1109/tpami.2017.2699184

6. Engel J., Koltun V., Cremers D. Direct Sparse Odometry. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2018. Vol. 40, no. 3. P. 611–625. URL: https://doi.org/10.1109/tpami.2017.2658577

7. Forster C., Pizzoli M., Scaramuzza D. SVO: Fast semi-direct monocular visual odometry. *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2014. P. 15–22. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/6906584/citations#citations

8. G. Huang. Visual-Inertial Navigation: A Concise Review. *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2019. P. 9572-9582. URL: 10.1109/ICRA.2019.8793604

9. Information-Extreme Machine Learning of On-Board Vehicle Recognition System / A. S. Dovbysh et al. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2020. Vol. 56, no. 4. P. 534–543. URL: https://doi.org/10.1007/s10559-020-00269-y

10. Liu Y., Zhang L. Machine Vision and Deep Learning for Autonomous UAV Navigation. *Journal of Field Robotics*. 2018. No. 35(4). P. 665–684. URL: https://doi.org/10.1002/rob.21855

11. Otroshchenko M., Myronenko M. DETERMINING THE LOCATION OF THE AUTONOMOUS UAV. *Information Technology and Implementation (Satellite): Conference Proceedings*, Kyiv, 24 November 2024. Kyiv, 2024. P. 56–57. URL: http://iti.fit.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/Збірка-19_12_2024_ITI_2024-e.pdf

12. Park J., Lee H. GPS/IMU and Vision Integration for Autonomous UAV Navigation. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2017. P. 1–10. URL: https://doi.org/10.1155/2017/4792174

13. Radar/electro-optical data fusion for non-cooperative UAS sense and avoid / G. Fasano et al. *Aerospace Science and Technology*. 2015. Vol. 46. P. 436–450. URL: https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.08.010

14. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Lecture Notes in Computer Science*. Cham, 2015. P. 234–241. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

15. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual Odometry [Tutorial]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2011. Vol. 18, no. 4. P. 80–92. URL: https://doi.org/10.1109/mra.2011.943233

16. Singh, I. P., Patel, A. Visual odometry for autonomous vehicles. *Int. J. of Adv. Res. 7*. 2019. P. 1136–1144. URL: https://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/9765

References

1. Afghah F., Razi A., Chakareski J., Ashdown J. Wildfire Monitoring in Remote Areas using Autonomous Unmanned Aerial Vehicles // *arXiv preprint*. 2019. № arXiv:1905.00492. URL: https://arxiv.org/abs/1905.00492

2. Badrinarayanan, V., Kendall, A., & Cipolla, R. (2017). SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *39*(12), 2481–2495. https://doi.org/10.1109/tpami.2016.2644615

3. Chen, L.-C., Papandreou, G., Kokkinos, I., Murphy, K., & Yuille, A. L. (2018). DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *40*(4), 834–848. https://doi.org/10.1109/tpami.2017.2699184

4. Current status and perspective of remote sensing application in crop management / M. Jurišić et al. *Journal of Central European Agriculture*. 2021. Vol. 22, no. 1. P. 156–166. URL: :10.5513/JCEA01/22.1.3042

5. Dovbysh, A. S., Budnyk, M. M., Piatachenko, V. Y., & Myronenko, M. I. (2020). Information-Extreme Machine Learning of On-Board Vehicle Recognition System. *Cybernetics and Systems Analysis*, *56*(4), 534–543. https://doi.org/10.1007/s10559-020-00269-y

6. Engel, J., Koltun, V., & Cremers, D. (2018). Direct Sparse Odometry. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *40*(3), 611–625. https://doi.org/10.1109/tpami.2017.2658577

7. Fasano, G., Accardo, D., Tirri, A. E., Moccia, A., & De Lellis, E. (2015). Radar/electro-optical data fusion for non-cooperative UAS sense and avoid. *Aerospace Science and Technology*, *46*, 436–450. https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.08.010

8. Forster, C., Pizzoli, M., & Scaramuzza, D. (2014). SVO: Fast semi-direct monocular visual odometry. *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 15–22. https://ieeexplore.ieee.org/document/6906584/citations#citations

9. G. Huang. Visual-Inertial Navigation: A Concise Review. *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2019. P. 9572–9582. URL: 10.1109/ICRA.2019.8793604

10. Liu, Zhang, Tian & Liu. (2019). An Onboard Vision-Based System for Autonomous Landing of a Low-Cost Quadrotor on a Novel Landing Pad. *Sensors*, *19*(21), 4703. https://doi.org/10.3390/s19214703

11. Liu, Y., & Zhang, L. (2018). Machine Vision and Deep Learning for Autonomous UAV Navigation. *Journal of Field Robotics*, (35(4)), 665–684. https://doi.org/10.1002/rob.21855

12. Otroshchenko, M., & Myronenko, M. (2024). DETERMINING THE LOCATION OF THE AUTONOMOUS UAV. У *Information Technology and Implementation (Satellite): Conference Proceedings* (с. 56–57). Taras Shevchenko National University of Kyiv. http://iti.fit.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/Збірка-19_12_2024_ITI_2024-e.pdf

13. Park, J., & Lee, H. (2017). GPS/IMU and Vision Integration for Autonomous UAV Navigation. *International Journal of Aerospace Engineering*, 1–10. https://doi.org/10.1155/2017/4792174

14. Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. У *Lecture Notes in Computer Science* (с. 234–241). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

15. Scaramuzza, D., & Fraundorfer, F. (2011). Visual Odometry [Tutorial]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, *18*(4), 80–92. https://doi.org/10.1109/mra.2011.943233

16. Singh, I. P., Patel, A. Visual odometry for autonomous vehicles. *Int. J. of Adv. Res. 7*. 2019. P. 1136–1144. URL: https://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/9765

УДК 681.5 + 519.873 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.32

О. М. ПАВЛЮК
кандидат технічних наук,
доцент кафедри автоматизованих систем управління
Інститут комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Національного університету «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0003-4561-3874

М. О. МЕДИКОВСЬКИЙ
доктор технічних наук,
професор кафедри автоматизованих систем управління
Інститут комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Національного університету «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0003-2492-8578

М. В. МІЩУК
асистент кафедри автоматизованих систем управління
Інститут комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Національного університету «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0001-8723-2514

А. О. ЗАБОЛОТНА
студентка кафедри автоматизованих систем управління
Інститут комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Національного університету «Львівська політехніка»
ORCID: 0009-0003-0389-3801

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ПЛАТФОРМ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

У представленій роботі досліджено проблему забезпечення надійності системи управління мобільними роботизованими платформами (МРП), які часто використовують в сучасних внутрішньо-логістичних системах промислових підприємств. Запропоновано стандартизований підхід оцінки надійності компонентів системи МРП з урахуванням структурної надмірності, послідовно-паралельної архітектури та деградаційних процесів у складних виробничих середовищах. За допомогою математичного моделювання розраховано функції надійності для системи МРП середнього класу вагою від 500 до 1000 кг. Обчислено середній час до відмови MTTF та інтенсивність відмов для ключових компонентів МРП. Як результат дослідження одержано MTBF = 19 802 год, або близько 2.26 років безперервної роботи MTBF є високим показником для середнього класу МРП, які зазвичай мають MTBF у межах 10 000–20 000 год. і є адекватним показником для МРП промислового класу. Інтенсивність відмов $\lambda_{total} = 5.0499 \times 10^{-5}$ 1/год складає середню частоту відмов приблизно 1 раз на 19 800 год. Коефіцієнт готовності A ≈ 0.998991 – це означає, що система буде готова до роботи 99.9 % часу, тобто простої будуть дуже рідкісними. Це відповідає вимогам індустрій до AGV, що працюють на виробничих лініях.

На основі розрахунків визначено критичні елементи для резервування і алгоритм реконфігурації системи керування з урахуванням зміни її надійнісних характеристик. Насамперед, відмова окремих компонентів свідчить про те, що найменш надійним компонентом є лідар з найвищою інтенсивністю відмов. Найнадійніший компонент це комунікація з резервуванням (BLE або WiFi) із найнижим λ. Шасі та камера мають високу надійність, що важливо для довготривалого використання. Запропоновані підходи можна використати для підвищення безвідмовності, адаптивності та загальної ефективності внутрішньозаводських логістичних систем в умовах Індустрії 4.0 та 5.0.

Ключові слова: *мобільна роботизована платформа, надійність, робастність, закон розподілу, середній час до відмови, інтенсивність відмов.*

O. M. PAVLIUK
PhD, Associate Professor at the Department of Automated Control Systems
Institute of Computer Sciences and Information Technologies
of Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0003-4561-3874

M. O. MEDYKOVSKYY
Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Department of Automated Control Systems
Institute of Computer Sciences and Information Technologies
of Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0003-2492-8578

M. V. MISHCHUK
Assistant Lecturer at the Department of Automated Control Systems
Institute of Computer Sciences and Information Technologies
of Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0001-8723-2514

A. O. ZABOLOTNA
Student at the Department of Automated Control Systems
Institute of Computer Sciences and Information Technologies
of Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0009-0003-0389-3801

RELIABILITY ASSESSMENT OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISE PLATFORM SYSTEM

The presented study investigates the problem of ensuring the reliability of the control system for mobile robotic platforms (MRPs), which are commonly used in modern intralogistics systems of industrial enterprises. A standardized approach is proposed for assessing the reliability of MRP system components, taking into account structural redundancy, series-parallel architecture, and degradation processes in complex industrial environments. Using mathematical modeling, reliability functions were calculated for a mid-range MRP system with a payload capacity of 500 to 1000 kg. The Mean Time To Failure (MTTF) and failure rate were computed for key MRP components.

As a result of the study, the obtained Mean Time Between Failures (MTBF) is 19,802 hours, or approximately 2.26 years of continuous operation. This MTBF is a high value for mid-range MRPs, which typically exhibit MTBF values in the range of 10,000–20,000 hours, and it is a suitable indicator for industrial-grade platforms.

The overall failure rate was determined as $\lambda_{total} = 5.0499 \times 10^{-5}$ failures/hour, which corresponds to an average failure frequency of approximately once every 19,800 hours.

The availability coefficient $A \approx 0.998991$ indicates that the system will be operational 99.9 % of the time, meaning downtimes will be extremely rare. This aligns with the requirements for AGVs (Automated Guided Vehicles) operating on production lines.

Based on the calculations, critical elements for redundancy were identified, as well as a reconfiguration algorithm for the control system considering changes in its reliability characteristics.

The failure of individual components indicates that the least reliable component is the LiDAR, exhibiting the highest failure rate. The most reliable component is the redundant communication module (BLE or WiFi), with the lowest λ value. Both the chassis and the camera show high reliability, which is essential for long-term operation.

The proposed approaches can be used to enhance the fault tolerance, adaptability, and overall efficiency of intralogistics systems within the frameworks of Industry 4.0 and 5.0.

Key words: *mobile robotic platform, reliability, robustness, probability distribution law, mean time to failure (MTTF), failure rate.*

Вступ

Мобільні роботизовані платформи (МРП) в англомовній літературі Mobile Robotic Platforms (MRP) це автономні чи напівавтономні мобільні пристрої, які служать базовою основою для створення різноманітних роботизованих систем. Із їх використанням можна переміщувати вантажі в просторі. На їх основі можна будувати автоматизовані транспортні засоби (AGV), мобільні маніпулятори, роботи для інспекції, доставки, моніторингу тощо. Автоматизовані керовані транспортні засоби (АКТЗ) в англомовній літературі Automated Guided Vehicle (AGV) використовуються для внутрішньозаводської логістики з метою транспортування матеріалів, деталей або готової продукції між різними ділянками підприємства. Вони працюють у загальному просторі промислового підприємства, наприклад, у зонах складу, виробництва та упаковки – паралельно. Якщо виконуються етапи технологічного процесу, які залежать один від одного – послідовно. В сучасних внутрішньозаводських логістичних системах робота МРП координується через центральну або розподілену систему управління. Враховуючи складність такої системи управління МРП, особливо в умовах обмежених ресурсів надзвичайно актуальним стає питання визначення їх надійності та робастності. Надійність системи управління МРП відповідає за її здатність стабільно, безперервно та точно виконувати покладені функції, наприклад, навігацію координацію, безпечну взаємодію, виконання завдань протягом визначеного періоду часу в умовах промислового середовища. Надійність повинна

забезпечувати: безвідмовність, стійкість до відмов, надійний зв'язок, прийняття рішень в реальному часі, відновлення після помилок, кібербезпеку. Робастність системи управління МРП полягає у здатності системи зберігати адекватну продуктивність при порушенні зв'язку, відмові одного або кількох МРП, частковому виході з ладу серверів або шлюзів. Тобто надійність є основою для забезпечення робастності. Без передбачення ймовірності відмов неможливо гарантувати стабільність при збуреннях (переривання або втрата зв'язку між МРП і керуючими серверами; відмова одного або кількох МРП під час виконання завдання; вихід з ладу окремих компонентів інфраструктури, таких як сервери, шлюзи, навігаційні маяки тощо; непередбачені зміни в середовищі такі як раптова поява перешкод, людська активність). Зв'язок між надійністю та робастністю представлений в таблиці 1.

Таблиця 1

Зв'язок між надійністю та робастністю

Надійність	Робастність
Запобігає відмовам і забезпечує стабільну роботу	Зберігає адекватну поведінку при вже наявних відмовах чи порушеннях
Базується на технічній відмовостійкості	Передбачає гнучкість і адаптивність алгоритмів керування
Включає моніторинг, резервування, контроль справності	Включає динамічну реконфігурацію, переназначення маршрутів і завдань

Тобто в разі раптової втрати зв'язку з одним із шлюзів керуюча система на основі надійної архітектури не допускає повної втрати інформації, наприклад, завдяки локальній автономії кожного МРП. Тобто завдяки робастним алгоритмам система управління МРП швидко перебудовує маршрути інших платформ, перерозподіляє завдання, зберігаючи свою загальну продуктивність.

Логістичні системи промислових підприємств в умовах Індустрій 4.0 та 5.0 які використовують МРП можна описати універсальною моделлю управління з послідовно-паралельною архітектурою. Вона дозволить враховувати структурну надмірність, тобто наявність резервних маршрутів, дублювання вузлів управління та альтернативних платформ. Така надмірність є основою робастного дизайну системи управління. Проте, на практиці виникає потреба у формалізованому підході до оцінки надійності системи, що дозволяє: ідентифікувати критичні компоненти з низькою надійністю; прогнозувати поведінку системи у випадку деградацій або відмов; адаптувати алгоритми розподіленого управління з урахуванням імовірнісної інформації про надійність компонентів.

Постановка проблеми: побудувати формалізований підхід до ідентифікації слабких місць, адаптації архітектури, а також реконфігурації системи керування МРП з урахуванням зниження надійності або часткових відмов компонентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Надійність, безпечна експлуатація та здатність до безперервної роботи МРП у складних умовах безпосередньо впливають на ефективність всього виробництва. Оцінка надійності таких систем розглядається у багатьох наукових дослідженнях. Систематичний огляд [1, 2] акцентує увагу на поєднанні МРП із дронами у виробничих системах. Хоча основний фокус зроблено на функціональній взаємодії, дослідники підкреслюють потребу в забезпеченні високої надійності таких систем оскільки вона є ключовим фактором, що визначає ефективність і безперервність операцій підприємств. Значний огляд сучасного стану розробки сервісних роботів наведено у роботі [3]. Автор систематизував більше 150 публікацій, розглянувши теми функціональної надійності, довговічності, автономності та адаптації сервісних роботів до складних умов експлуатації. У контексті промислових платформ ця робота важлива тим, що висвітлює тренди в стандартизації технічного обслуговування, предиктивної діагностики та автоматичного калібрування систем, що має безпосереднє застосування для систем МРП.

У публікаціях [4, 5] співавтори висвітлюють нові архітектури для мобільних роботів, які інтегрують апаратне та програмне резервування, що значно підвищує стійкість систем до відмов і сприяє більшій безпеці експлуатації на виробництві. Це особливо важливо для платформ промислового підприємства, де зупинки призводять до значних економічних втрат.

У публікаціях [6, 7] представлено науковий прогрес у виявленні та діагностиці відмов у мультиагентних роботизованих системах. Він відкриває нові перспективи для підвищення надійності через швидке локалізування та ізоляцію несправностей, що дозволяє оперативно відновлювати роботу системи без повної зупинки виробництва.

Значущим напрямом є оптимізація руху і маршрутизації МРП, що обговорюється [8, 9, 10]. Впровадження ієрархічного управління і запобігання «заторів» і підвищують загальну надійність логістичних ланцюгів, що є новим кроком в інтеграції систем руху з оцінкою надійності.

Публікації [11, 12] демонструють переваги кооперативної хмарної робототехніки та модульних архітектур для багатоплатформенних систем, що дає змогу не тільки підвищувати надійність, але й забезпечувати гнучкість у масштабуванні виробничих процесів.

Важливим аспектом є питання комунікації і безпеки, що розглядають [10, 12]. Вони підкреслюють наукову новизну у використанні алгоритмів ШІ для моніторингу і захисту каналів зв'язку, що мінімізує ризики відмов через кібератаки і нестабільність мережевого середовища.

В огляді [13] вказується на сучасні обмеження і прогалини в дослідженнях МРП у внутрішній логістиці, що підкреслює необхідність подальшого розвитку надійних систем з урахуванням складності реальних виробничих умов.

У контексті забезпечення надійності МРП важливу роль відіграє архітектура систем управління з допуском до відмов [14] запропоновано нову архітектуру FTC для мобільних маніпуляторів, яка дозволяє зберігати функціональність навіть за умов часткових збоїв апаратного або програмного забезпечення. Автори застосовують гібридний підхід, який поєднує моніторинг стану, діагностику несправностей та адаптивне управління, що є важливим науковим внеском у галузі забезпечення надійності систем у науково-виробничих середовищах.

У публікації [15] автори пропонують нову методологію для оптимізації проєктування, експлуатації та обслуговування багатоплатформенних AGV-систем. Дослідження охоплюють використання стохастичних моделей для прогнозування збоїв та запобігання критичним відмовам. Запропонований підхід дозволяє досягти зниження простоїв та підвищення коефіцієнта готовності системи. Наукова новизна полягає у глибокій інтеграції моделей надійності з експлуатаційними параметрами (наприклад, MTTR, MTTF, λ) на рівні системного проєктування.

Формулювання мети дослідження

Розробити метод оцінки надійності системи керування мобільними платформами промислового підприємства з урахуванням структурної надмірності, на основі аналізу функцій надійності (R(t)), середнього часу до відмови (MTTF) та інтенсивності відмов (λ(t)) для визначення слабких місць та адаптації алгоритмів управління в умовах деградації системи.

1. Побудувати математичну модель послідовно-паралельної структури МРП із резервними маршрутами та вузлами.
2. Провести аналітичний розрахунок R(t), MTTF, λ(t) для ключових компонентів (МРП, маршрути, шлюзи, сервери).
3. Розробити критерії визначення критичних елементів, які потребують резервування.
4. Сформулювати алгоритм реконфігурації системи управління у відповідь на зміну характеристик надійності.
5. Інтегрувати надійнісні характеристики в стратегії розподіленого планування завдань та маршрутів МРП.

Викладення основного матеріалу дослідження

Математичне формулювання уніфікованої моделі оцінки надійності системи МРП з урахуванням структурної надмірності, послідовно-паралельної архітектури, а також адаптації в умовах деградації системи можна представити таким чином.

Нехай система МРП описана графом

$$G = (V, E) \tag{1}$$

де $V = \{v_1, v_2, \ldots, v_n\}$ – множина вузлів системи (МРП, сервери, шлюзи); $E = \{e_{ij}\} \subseteq V \times V$ – множина маршрутів зв'язку або фізичних шляхів (у тому числі резервних).

Надійність компонентів системи обчислюють так. Нехай кожен компонент $i \in V \cup E$ має функцію надійності

$$R_i(t) = P(T_i > t) \tag{2}$$

де T_i – час до відмови компонента i.

Інтенсивність відмов $\lambda_i(t)$ обчислюють так, якщо розподіл експоненційний:

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i t} \tag{3}$$

якщо розподіл Вейбулла

$$(t) = e^{-\lambda_i t^{-\beta}}. \tag{4}$$

Середній час до відмови (MTTF):

$$MTTF_i = \int_0^\infty R_i(t)dt. \tag{5}$$

Надійність системи МРП розраховуватиметься згідно типів зв'язку.

Для послідовно-паралельної структури, функція надійності $R_{syst}(t)$ розраховується наступним чином.

Для послідовного з'єднання компонентів:

$$R_{segm}(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t). \tag{6}$$

Для паралельного з'єднання (наприклад, резервні маршрути або дубльовані шлюзи):

$$R_{par}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - R_i(t)). \tag{7}$$

Для загальної системи МРП:

$$R_{sys}(t) = F(R_1(t), R_2(t), \ldots, R_n(t)), \tag{8}$$

де F – композиція відповідно до графа G системи.

Здійснимо розрахунок характеристик надійності для модульної МРМ середнього розміру яка має вагу від 500 до 1000 кг. Структура надійності модульної МРП представлена на рисунку 1.

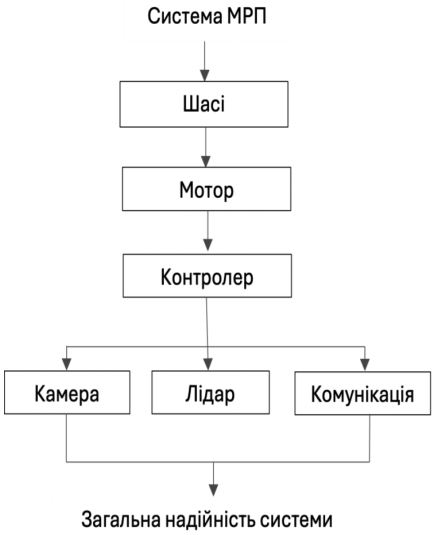


Рис. 1. Структура надійності модульної МРП

Згідно цього рисунку шасі мотор та контролер під'єднані послідовно вони утворюють одне серійне з'єднання. Шасі підпорядковується закону Вейбулла, оскільки воно має інтенсивне зношування і часто швидко деградує. Мотор підлягає експоненціальному закону розподілу в зв'язку з тим що є досить надійною надійним елементом системи. Контролер теж підлягає закону Вейбулла. Значеннями коефіцієнта бета в степені можемо враховувати ступінь деградації шасі та контролера.

Наступна частина схеми відповідає за паралельне з'єднання елементів. До неї належить камера, лідар та система комунікації яка включає WiFi та BLE. Камера та лідар описують експоненціальним законом розподілу. Систему комунікації обчислюють як різницю добуток ймовірностей того, що Wi-Fi не спрацює і BLE не спрацює. В цій частині схеми достатньо щоб працював хоча б один елемент. Значення параметрів МРП представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Значення параметрів МРП

Компонент	Тип розподілу	Параметри
Шасі	Weibull	k = 1.5, λ = 150 000
Контролер	Weibull	k = 1.3, λ = 120 000
Мотор	Експоненційний	λ = 1/110 000
Камера	Експоненційний	λ = 1/120 000
Лідар	Експоненційний	λ = 1/100 000
WiFi / BLE	Експоненційний	λ = 1/80 000/1/70 000
Комунікація	Резервування	λ = 1/(1/λ_WiFi + 1/λ_BLE)

Основними метриками є

- MTTF (Mean Time To Failure), тобто середній час до відмови;
- інтенсивність відмов λ(t);
- функція напрацювання на відмову $a(t)$;
- готовність системи (Availability);
- часова інтенсивність відмов λ(t), hazard-функція $a(t)$ та умовний час до відмови $T(t)$.

Зокрема для закону Вейбулла $MTTF = \lambda \cdot \Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)$.

У таблиці 3 представлено розрахунок MTTF для всіх елементів МРП.

Таблиця 3

Розрахунок MTTF для всіх елементів МРП

Елемент	MTTF (год)
Шасі(Weibull)	135 411.79
Контролер (Weibull)	110 829.21
Мотор (Exp)	110 000.00
Камера (Exp)	120 000.00
Лідар (Exp)	100 000.00
Комунікація (WiFi або BLE резервування)	150 000.00

Всі отримані значення MTTF є в допустимих межах. В таблиці 4 для порівняння з отриманими результатами представлені допустимі межі для МРП середнього розміру вагою від 500 до 1000 кг.

Таблиця 4

Допустимі межі MTTF для МРП середнього розміру

Елемент	MTTF (год)	Типові межі MTTF для МРП (500–1000 кг)	Коментар
Шасі(Weibull)	135,412	100,000–200,000	Високий ресурс сталевих шасі
Контролер (Weibull)	110,829	80,000–150,000	Залежить від типу CPU та плати
Мотор (Exp)	110,000	100,000–200,000	Типово для brushless DC motors
Камера (Exp)	120,000	60,000–150,000	Особливо у промислових умовах
Лідар (Exp)	100,000	60,000–120,000	Часто слабша ланка, ніж камера
Комунікація (WiFi або BLE)	150,000	80,000–160,000 (з резервуванням)	Резервування WiFi/BLE значно підвищує надійність

MTBF цілої системи МРП складає 19 802.50 год при готовності системи $A \approx 0.998991$

На рис. 2 представлені λ(t) інтенсивність відмови кожного елемента системи МРП.

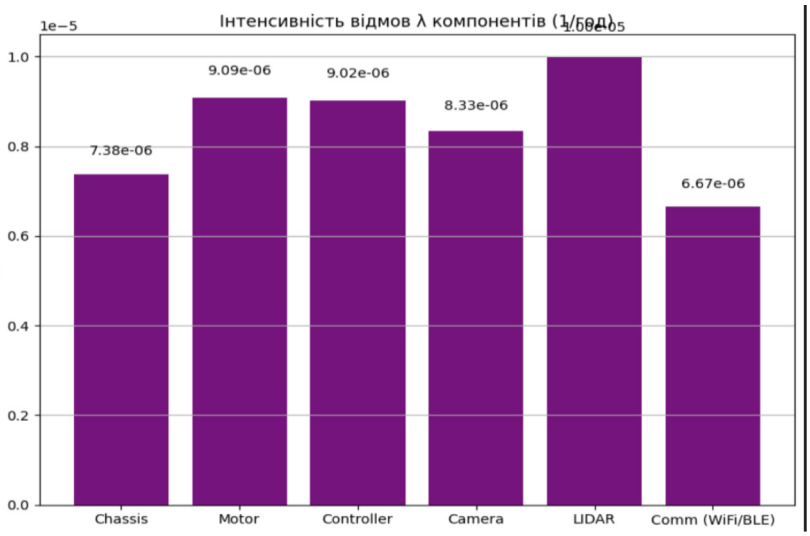


Рис. 2. λ(*t*) інтенсивність відмови кожного елемента системи МРП

З рисунка 2 видно що найменшу інтенсивність відмов має кумунікаційна система, а найбільшу – лідар. На рис. 3 представлена λ(t) інтенсивність відмови системи МРП.

Ця функція відображає ймовірність відмови в наступний момент часу за умови, що система працювала до часу t. На початковому етапі ($t \approx 0$) λ(t) є відносно низькою, що характерно для стадії «дитячих хвороб». У середині експлуатації – λ(t) стабілізується на постійному рівні, особливо для компонентів з експоненціальним законом (мотор, камера, лідар). На пізній стадії експлуатації при великих значеннях t, λ(t) починає зростати, через старіння елементів, таких як шасі та контролер які підпорядковуються розподілу моделі Вейбулла.

На рис. 4 зображена функція напрацювання на відмову $a(t)$

Функція $a(t)$ – густина ймовірності відмови в момент часу t описує частоту виникнення відмов у системі на кожній ділянці часу. Форма графіка $a(t)$ залежить від поєднання компонентів з експоненційним і розподілами Вейбулла. Функція $a(t)$ має один максимум, який вказує на найбільш ймовірний час відмови. Ця функція допомагає прогнозувати «гарячу зону» відмов для логістичного планування.

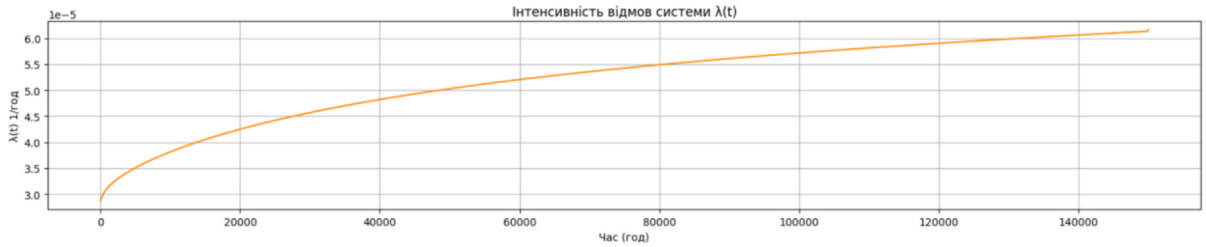


Рис. 3. λ(*t*) інтенсивність відмови системи МРП



Рис. 4. Функція напрацювання на відмову *a*(*t*)

На рис. 5 зображена функція очікуваного часу до відмови на момент часу t.

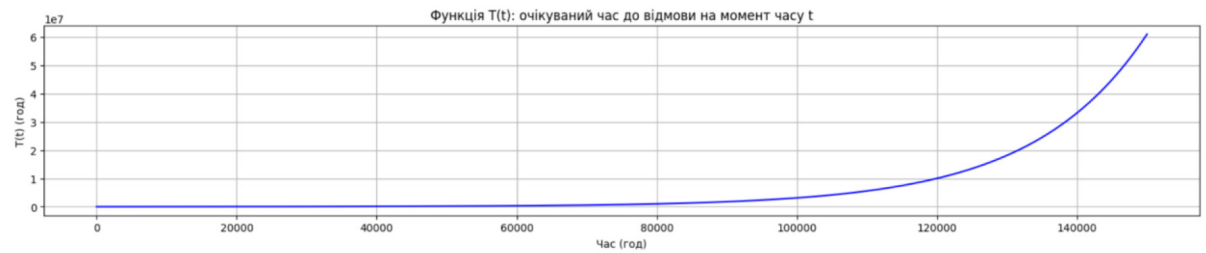


Рис. 5. функція очікуваного часу до відмови на момент часу *t*

Очікуваний час до відмови показує скільки ще зможе пропрацювати система, якщо вона вже пропрацювала до моменту t. Спочатку функція має високе значення, бо ймовірність ранньої відмови низька. Ця функція є корисною для адаптивного планування обслуговування, коли рішення приймаються в реальному часі. Разом ці графіки утворюють повну картину надійності системи МРП, дозволяючи оцінювати: потенційно небезпечні інтервали експлуатації; найоптимальніші моменти для обслуговування; загальну стійкість системи до відмов.

На рис. 6 зображені ймовірності роботи та відмови цілої системи МРП.

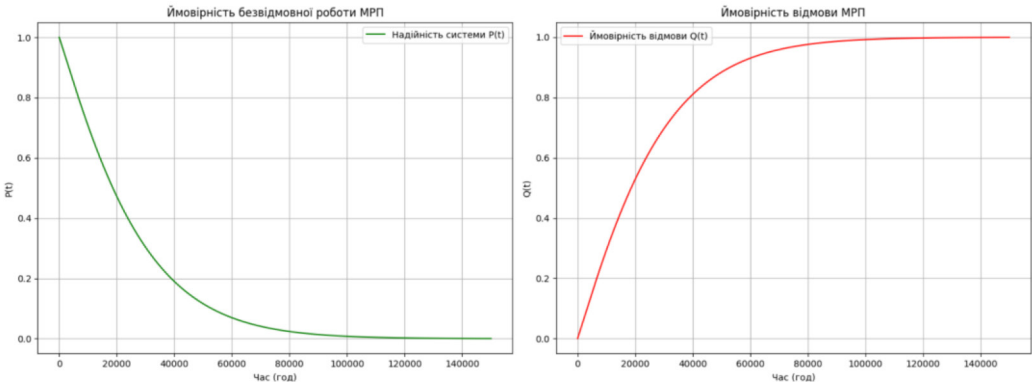


Рис. 6. Ймовірності роботи та відмови цілої системи МРП

MTTR тобто середній час, необхідний для виявлення, діагностики та усунення відмови системи, включно з очікуванням на запасні частини, доступністю сервісного персоналу тощо. MTTR системи = 20.00 год є типовим для складної МРП промислового класу. Він включає: виявлення несправності; діагностику з використанням

журналів або телеметрії; заміну або ремонт вийшовшого з ладу компонента (наприклад, лідару або контролера); тестування після ремонту.

Висновки

Загальний рівень надійності оцінюємо за допомогою MTBF, який дорівнює 19 802 год, або близько 2.26 років безперервної роботи (24/7). Це досить високий показник для МРП середнього класу (500–1000 кг), які зазвичай мають MTBF у межах 10 000–20 000 год. Інтенсивність відмов $\lambda_{total} = 5.0499 \cdot 10^{-5}$ 1/год – також підтверджує середню частоту відмов приблизно 1 раз на 19 800 год.

Відмова окремих компонентів представлена в таблиці 1 вказують на то, що найменш надійним компонентом є лідар із найвищою інтенсивністю відмов. Найнадійніший компонент це комунікація з резервуванням (BLE або WiFi) із найнижим λ. Шасі та камера мають високу надійність, що важливо для довготривалого використання.

Технічна готовність вказує, що *MTTR* = 20 год (середній час на ремонт) є адекватним показником для МРП промислового класу. Коефіцієнт готовності $A \approx 0.998991$ – це означає, що система буде готова до роботи 99.9 % часу, тобто простої будуть дуже рідкісними. Це відповідає вимогам індустрій до МРП, що працюють на виробничих лініях.

Загалом, МРП має високу надійність, що забезпечується:

- використанням надійних основних компонентів (мотор, камера, контролер);
- застосуванням резервування в критичному модулі комунікації;
- прийнятним часом ремонту.

Потенційним вузьким місцем є лідар, який має найменший MTTF. Для зменшення ризиків можна:

- застосовувати резервний сенсор або періодичну профілактику;
- використовувати інтелектуальну діагностику, щоб вчасно виявляти деградацію.

Список використаної літератури

1. Formal Specification and Verification of Autonomous Robotic Systems [Electronic resource] / Matt Luckcuck [et al.] // ACM Computing Surveys. 2019. Vol. 52, no. 5. P. 1–41. Mode of access: https://doi.org/10.1145/3342355

2. Systematic literature review of applications and usage potentials for the combination of unmanned aerial vehicles and mobile robot manipulators in production systems [Electronic resource] / Jannis Sinnemann [et al.] // Production Engineering. 2022. Mode of access: https://doi.org/10.1007/s11740-022-01109-y

3. Lee I. Service Robots: A Systematic Literature Review [Electronic resource] / In Lee // Electronics. 2021. Vol. 10, no. 21. P. 2658. Mode of access: https://doi.org/10.3390/electronics10212658

4. Milecki A. Review of Fault-Tolerant Control Systems Used in Robotic Manipulators [Electronic resource] / Andrzej Milecki, Patryk Nowak // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, no. 4. P. 2675. Mode of access: https://doi.org/10.3390/app13042675

5. Pierpaoli P. Fault Tolerant Control for Networked Mobile Robots [Electronic resource] / Pietro Pierpaoli, Dominique Sauter, Magnus Egerstedt // 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), Copenhagen, 21–24 August 2018. [S. l.], 2018. Mode of access: https://doi.org/10.1109/ccta.2018.8511420

6. Khalastchi E. Fault Detection and Diagnosis in Multi-Robot Systems: A Survey [Electronic resource] / Eliahu Khalastchi, Meir Kalech // Sensors. 2019. Vol. 19, no. 18. P. 4019. Mode of access: https://doi.org/10.3390/s19184019

7. Leite A. A Safety Monitoring Model for a Faulty Mobile Robot [Electronic resource] / André Leite, Andry Pinto, Aníbal Matos // Robotics. 2018. Vol. 7, no. 3. P. 32. Mode of access: https://doi.org/10.3390/robotics7030032

8. Ventura J. A. Optimal location of dwell points in a single loop AGV system with time restrictions on vehicle availability [Electronic resource] / José A. Ventura, Brian Q. Rieksts // European Journal of Operational Research. 2009. Vol. 192, no. 1. P. 93–104. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.09.014

9. Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda [Electronic resource] / Giuseppe Fragapane [et al.] // European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 294, no. 2. P. 405–426. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.01.019

10. Hierarchical Traffic Management of Multi-AGV Systems With Deadlock Prevention Applied to Industrial Environments [Electronic resource] / Federico Pratissoli [et al.] // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2023. P. 1–15. Mode of access: https://doi.org/10.1109/tase.2023.3276233

11. Cooperative cloud robotics architecture for the coordination of multi-AGV systems in industrial warehouses [Electronic resource] / Elena Cardarelli [et al.] // Mechatronics. 2017. Vol. 45. P. 1–13. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.04.005

12. A Comprehensive Framework for the Design of Modular Robotic Mobile Fulfillment Systems [Electronic resource] / Wei Wang [et al.] // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 13259–13269. Mode of access: https://doi.org/10.1109/access.2020.2966403

13. Review of autonomous mobile robots in intralogistics: state-of-the-art, limitations and research gaps [Electronic resource] / Thorge Lackner [et al.] // Procedia CIRP. 2024. Vol. 130. P. 930–935. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.187

14. Fault Tolerant Control Architecture Design for Mobile Manipulation in Scientific Facilities [Electronic resource] / Mohammad M. Aref [et al.] // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2015. Vol. 12, no. 1. P. 4. Mode of access: https://doi.org/10.5772/60038

15. Yan R. Novel methodology for optimising the design, operation and maintenance of a multi-AGV system [Electronic resource] / Rundong Yan, S. J. Dunnett, L. M. Jackson // Reliability Engineering & System Safety. 2018. Vol. 178. P. 130–139. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.06.003

References

1. Formal Specification and Verification of Autonomous Robotic Systems [Electronic resource] / Matt Luckcuck [et al.] // ACM Computing Surveys. 2019. Vol. 52, no. 5. P. 1–41. Mode of access: https://doi.org/10.1145/3342355

2. Systematic literature review of applications and usage potentials for the combination of unmanned aerial vehicles and mobile robot manipulators in production systems [Electronic resource] / Jannis Sinnemann [et al.] // Production Engineering. 2022. Mode of access: https://doi.org/10.1007/s11740-022-01109-y

3. Lee I. Service Robots: A Systematic Literature Review [Electronic resource] / In Lee // Electronics. 2021. Vol. 10, no. 21. P. 2658. Mode of access: https://doi.org/10.3390/electronics10212658

4. Milecki A. Review of Fault-Tolerant Control Systems Used in Robotic Manipulators [Electronic resource] / Andrzej Milecki, Patryk Nowak // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, no. 4. P. 2675. Mode of access: https://doi.org/10.3390/app13042675

5. Pierpaoli P. Fault Tolerant Control for Networked Mobile Robots [Electronic resource] / Pietro Pierpaoli, Dominique Sauter, Magnus Egerstedt // 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), Copenhagen, 21–24 August 2018. [S. l.], 2018. Mode of access: https://doi.org/10.1109/ccta.2018.8511420

6. Khalastchi E. Fault Detection and Diagnosis in Multi-Robot Systems: A Survey [Electronic resource] / Eliahu Khalastchi, Meir Kalech // Sensors. 2019. Vol. 19, no. 18. P. 4019. Mode of access: https://doi.org/10.3390/s19184019

7. Leite A. A Safety Monitoring Model for a Faulty Mobile Robot [Electronic resource] / André Leite, Andry Pinto, Aníbal Matos // Robotics. 2018. Vol. 7, no. 3. P. 32. Mode of access: https://doi.org/10.3390/robotics7030032

8. Ventura J. A. Optimal location of dwell points in a single loop AGV system with time restrictions on vehicle availability [Electronic resource] / José A. Ventura, Brian Q. Rieksts // European Journal of Operational Research. 2009. Vol. 192, no. 1. P. 93–104. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.09.014

9. Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda [Electronic resource] / Giuseppe Fragapane [et al.] // European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 294, no. 2. P. 405–426. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.01.019

10. Hierarchical Traffic Management of Multi-AGV Systems With Deadlock Prevention Applied to Industrial Environments [Electronic resource] / Federico Pratissoli [et al.] // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2023. P. 1–15. Mode of access: https://doi.org/10.1109/tase.2023.3276233

11. Cooperative cloud robotics architecture for the coordination of multi-AGV systems in industrial warehouses [Electronic resource] / Elena Cardarelli [et al.] // Mechatronics. 2017. Vol. 45. P. 1–13. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.04.005

12. A Comprehensive Framework for the Design of Modular Robotic Mobile Fulfillment Systems [Electronic resource] / Wei Wang [et al.] // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 13259–13269. Mode of access: https://doi.org/10.1109/access.2020.2966403

13. Review of autonomous mobile robots in intralogistics: state-of-the-art, limitations and research gaps [Electronic resource] / Thorge Lackner [et al.] // Procedia CIRP. 2024. Vol. 130. P. 930–935. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.187

14. Fault Tolerant Control Architecture Design for Mobile Manipulation in Scientific Facilities [Electronic resource] / Mohammad M. Aref [et al.] // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2015. Vol. 12, no. 1. P. 4. Mode of access: https://doi.org/10.5772/60038

15. Yan R. Novel methodology for optimising the design, operation and maintenance of a multi-AGV system [Electronic resource] / Rundong Yan, S. J. Dunnett, L. M. Jackson // Reliability Engineering & System Safety. 2018. Vol. 178. P. 130–139. Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.06.003

УДК 004.652.4 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.33

В. М. ПАХОМОВА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електронних обчислювальних машин
Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0000-0002-0022-099X

В. А. ТОДОРОВ
аспірант кафедри електронних обчислювальних машин
Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0009-0005-3097-5073

ДОСЛІДЖЕННЯ АРХІТЕКТУРИ РОЗПОДІЛЕНОЇ БАЗИ ДАНИХ В СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ЗАКУПІВЕЛЬ B2B КОМПАНІЙ

У даній роботі виконано розгляд можливих варіантів архітектури розподіленої бази даних як інноваційне рішення у системах управління закупівлями для B2B (business-to-business) компанії та проведено обґрунтування вибору системи управління базами даних (СУБД).

Під час воєнної агресії українські компанії потребують трансформації бізнес-моделей, спостерігається активне впровадження цілого ряду управлінських рішень, що в свою чергу потребує удосконалення відповідних інформаційних систем на основі інтеграції локальних баз даних. Запропоновані деякі архітектури розподіленої бази даних: архітектура «клієнт-сервер» з незалежними серверами; архітектура «клієнт-сервер» з взаємодіючими серверами та змішана архітектура, що передбачає наявність хмарного сховища, локальних серверів, а також їх поєднання та використання CRM/ERP (Customer Relationship Management / Enterprise Resource Planning) систем і нейронних мереж. Здійснено аналіз найбільш популярних систем управління базами даних щодо використання в системах управління закупівлями для B2B компанії, серед яких: PostrgreSQL; Oracle Database; MySQL; Microsoft SQL Server; MongoDB; MariaDB; IBM DB2; SAP HANA у контексті їх застосування в автоматизованих системах управління закупівельною діяльністю. Значна частина сучасних систем управління базами даних демонструє високу адаптивність до бізнес-процесів різного рівня складності. Представлені результати можуть бути використані як методологічна основа для побудови інформаційних систем закупівель, а також адаптації розподілених технологій у процесах цифрової трансформації корпоративного управління. Наукова новизна полягає в обґрунтуванні доцільності застосування змішаної (гібридної) клієнт-серверної архітектури розподілених баз даних в системах управління закупівлями для B2B компанії.

Ключові слова: *розподілена база даних, архітектура, клієнт-сервер, незалежні сервера, взаємодіючі сервера, гібридна модель, хмарне сховище, система управління базою даних.*

V. M. PAKHOMOVA
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electronic Computers
Dnipro Institute of Infrastructure and Transport
of Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-0022-099X

V. A. TODOROV
Postgraduate Student at the Department of Electronic Computers
Dnipro Institute of Infrastructure and Transport
of Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0009-0005-3097-5073

RESEARCH ON THE ARCHITECTURE OF DISTRIBUTED DATABASES IN PROCUREMENT MANAGEMENT SYSTEMS OF B2B COMPANIES

This paper explores possible architectures of distributed databases as an innovative solution for procurement management systems in B2B (business-to-business) companies and provides a rationale for selecting a databases management system (DBMS).

During the period of military aggression, Ukrainian companies face the need to transform their business models, with the active implementation of various managerial decisions. This, in turn, necessitates the improvement of corresponding

information systems through the integration of local databases. Several distributed database architectures are proposed: client-server architecture with independent servers, client-server architecture with cooperating servers, and a hybrid architecture that includes cloud storage, local servers, and their integration, along with the use of CRM/ERP (Customer Relationship Management / Enterprise Resource Planning) systems and neural networks. An analysis of the most widely used database management systems is conducted, including PostgreSQL, Oracle Database, MySQL, Microsoft SQL Server, MongoDB, MariaDB, IBM DB2, and SAP HANA, in the context of their application in automated procurement management systems. Many modern database management systems demonstrate high adaptability to business processes of varying complexity. The presented results can serve as a methodological basis for the development of procurement information systems and for the adaptation of distributed technologies in the processes of corporate digital transformation. The scientific novelty lies in the substantiation of the feasibility of using a mixed (hybrid) client-server architecture for distributed databases in procurement management systems for B2B companies.

Key words: *distributed database, architecture, client-server, independent servers, interacting servers, hybrid model, cloud storage, database management system.*

Постановка проблеми

Воєнний стан, що триває в Україні з 2022 року, призводить до скорочення внутрішнього ринку, втрати інфраструктури, закриття портів і логістичних ланцюгів. У поєднанні з високою міжнародною конкуренцією та масовою міграцією населення це формує надзвичайно складне середовище для ведення бізнесу в Україні. У цих умовах українські компанії потребують трансформації бізнес-моделей, спостерігається активне впровадження цілого ряду управлінських рішень, що в свою чергу потребує удосконалення відповідних інформаційних систем, основу яких складають бази даних (БД). З розвитком технологій і зростанням використання відповідних даних з'являються розподілені бази даних, багатоваріантність структур яких вимагає проведення дослідження, що підтверджує актуальність теми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз наукових джерел засвідчує, що вітчизняні дослідження, зокрема Берко А. Ю. та ін. [1, с. 38], зосереджені переважно на загальних підходах до проектування баз даних у корпоративних інформаційних системах, тоді як аспекти розподіленості розглядаються переважно як другорядні. Постніков О. О. [2, с. 53] та Швайко М. Л. [3, с. 167] досліджують управління закупівлями в умовах криз і цифрової трансформації, однак їхні роботи орієнтовані на управлінські та регуляторні аспекти без детального аналізу інформаційних архітектур. У міжнародному сегменті A. Althabatah та співавтори [4, с. 30], S. Herold та ін. [5, с. 434] висвітлюють вплив цифровізації та технологій Industry 4.0 на закупівельні процеси, тоді як B. Bender та співавтори [6, с. 489–490] аналізують еволюцію корпоративних моделей зберігання даних. Проте у згаданих працях розподілені БД здебільшого виступають як інфраструктурний компонент без фокусування на специфіці закупівельного функціоналу. Такий дисбаланс підтверджує наукову й практичну доцільність дослідження, присвяченого архітектурним рішенням для розподілених БД у системах управління закупівлями.

Формулювання мети дослідження

Проведені дослідження ставили за мету проєктування розподіленої бази даних як інтеграції існуючих локальних баз даних в системах управління закупівлями для B2B компанії. Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі: розгляд можливих варіантів архітектур розподілених баз даних та обґрунтування вибору СУБД.

Викладення основного матеріалу дослідження

Постановка задачі. У сучасних умовах трансформації бізнесу, особливо в період повномасштабної війни, системи управління B2B компаній зазнають суттєвих змін. Їх основними характеристиками є гнучкість, децентралізованість, адаптивність до зовнішніх викликів та високий рівень цифровізації. Такі системи включають корпоративні інструменти для документообігу, аналітики, командної взаємодії, а також активне використання хмарних сервісів та аутсорсингових моделей для другорядних бізнес-процесів.

На сучасному етапі поширеними локальними базами даних, що застосовуються у B2B сегменті, є:

1) Microsoft SQL Server (класичне рішення для локального зберігання структурованих даних);
2) Oracle DB (потужна СУБД для великих корпорацій);
3) 1С:Підприємство (поширена ERP-система з вбудованою БД, що активно використовується в українських компаніях). Однак у зв'язку з ускладненням бізнес-операцій, розширенням географії діяльності та збільшенням обсягів даних, виникає потреба у переході до розподілених баз даних, які забезпечують масштабованість, високу доступність і стійкість до збоїв. Крім того, дедалі актуальнішим стає застосування нейронних мереж та інших методів штучного інтелекту у B2B управлінні, зокрема:

1) розпізнавання бізнес документів (Optical Character Recognition);
2) аналіз залишків на складах;
3) автоматизації рутинних бізнес-процесів завдяки генеративному AI (Artificial Intelligence).

Таким чином, постає завдання: надати загальну характеристику систем управління B2B-компаній, визначити існуючі локальні СУБД, а також обґрунтувати необхідність переходу до розподілених архітектур з інтеграцією штучного інтелекту для підвищення ефективності управлінських рішень.

Розробка архітектур розподіленої бази даних. У контексті зростання обсягів даних та потреби в їх оперативній обробці, вибір моделі зберігання та керування інформаційними ресурсами стає критичним стратегічним рішенням для підприємств, зокрема у сфері закупівель. Залежно від рівня вимог до безпеки, витрат, гнучкості масштабування та контролю над інфраструктурою, найбільш поширеними є три підходи: хмарні, локальні та гібридні. В таблиці 1 наведено порівняльну характеристику кожної з моделей.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз моделей зберігання даних

Критерій	Хмарна модель	Локальна модель	Гібридна модель
Безпека	Обмежена, залежить від провайдера	Висока, контроль на стороні організації	Висока, контроль над критичними даними зберігається
Вартість	Низька початкова, зростає з обсягами	Висока початкова, сталі витрати	Середня, залежить від конфігурації
Масштабованість	Висока, автоматичне масштабування	Обмежена, потребує ручного втручання	Висока, за рахунок хмарного компонента
Контроль доступу	Обмежений, регламентований SLA	Повний контроль адміністратора	Регульований, з пріоритетом локального керування

Примітка: сформовано авторами на основі [7, с. 25].

У контексті проектування інформаційно-аналітичних систем, зокрема в сфері управління закупівлями, на думку Фісун М. Т., критично важливим є вибір архітектури розподіленої бази даних, яка б відповідала як функціональним вимогам, так і структурним особливостям організації. Архітектурна модель визначає спосіб взаємодії вузлів, рівень централізації обробки, способи синхронізації транзакцій і ефективність обміну даними.

До найбільш репрезентативних архітектурних підходів належать клієнт-серверна модель (у варіаціях з незалежними та взаємодіючими серверами), однорангова (peer-to-peer), а також змішана (гібридна), кожна з яких володіє специфічними перевагами й обмеженнями в контексті організаційної побудови системи, які відображені в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика архітектур розподілених БД

Архітектурна модель	Особливості реалізації	Доцільність використання у структурі компанії
Клієнт-сервер з незалежними серверами	Сервери функціонують автономно, обробка даних – локалізована	Доцільна для географічно розподілених відділів з високою автономією
Клієнт-сервер з взаємодіючими серверами	Сервери мають синхронізовану взаємодію, забезпечують узгодженість	Підходить для централізованих організацій зі складною координацією
Однорангова (P2P)	Відсутній централізований вузол, усі вузли – рівноправні	Ефективна в децентралізованих структурах або тимчасових об'єднаннях
Змішана (гібридна)	Комбінує характеристики кількох моделей залежно від задач	Універсальна для великих компаній із комбінованою структурою управління

Примітка: сформовано авторами на основі [8, с. 56–57].

Архітектура «клієнт-сервер» з незалежними серверами (рисунок 1) обробляє запити клієнтів виключно через центральний сервер, а допоміжні модулі не мають прямого зв'язку між собою.

Клієнт надсилає файл або запит до Procurement Server. Цей сервер окремо звертається до AI Server для обробки, до бази даних – для збереження полів, і до хмарного сховища – для зберігання файлу. Усі сервери ізольовані і не мають прямого зв'язку між собою – вся логіка проходить через головний сервер.

Архітектура «клієнт-сервер» з взаємодіючими серверами (рисунок 2) дозволяє модулям напряму обмінюватись даними, що знижує навантаження на центральний вузол і дозволяє паралельну обробку запитів.

Клієнт працює через Procurement Server, який ініціює обробку. Однак AI Server, база даних і Cloud Storage можуть напряму взаємодіяти між собою – обмінюватися файлами, записувати дані, виконувати запити. Це зменшує навантаження на центральний сервер і дозволяє паралельну обробку.

Гібридна архітектура (рисунок 3) поєднує централізоване управління із можливістю прямої взаємодії та масштабування окремих компонентів, зокрема за допомогою розподіленої бази даних. Клієнт надсилає дані через Procurement Server, який звертається до DB Node. Дані зберігаються не в одній базі, а в розподіленій системі з кількох DB вузлів, які можуть взаємодіяти між собою, у тому числі для шардування та реплікації. AI Server і Cloud Storage можуть напряму взаємодіяти з будь-яким вузлом, що забезпечує масштабованість і відмовостійкість.

З огляду на специфіку відділів закупівель великих B2B-компаній, які потребують підвищеного рівня безпеки, але не оперують критичними фінансовими транзакціями в реальному часі, доцільним виглядає впровадження гібридної моделі, що дозволяє зберігати конфіденційні документи локально, забезпечуючи максимальний

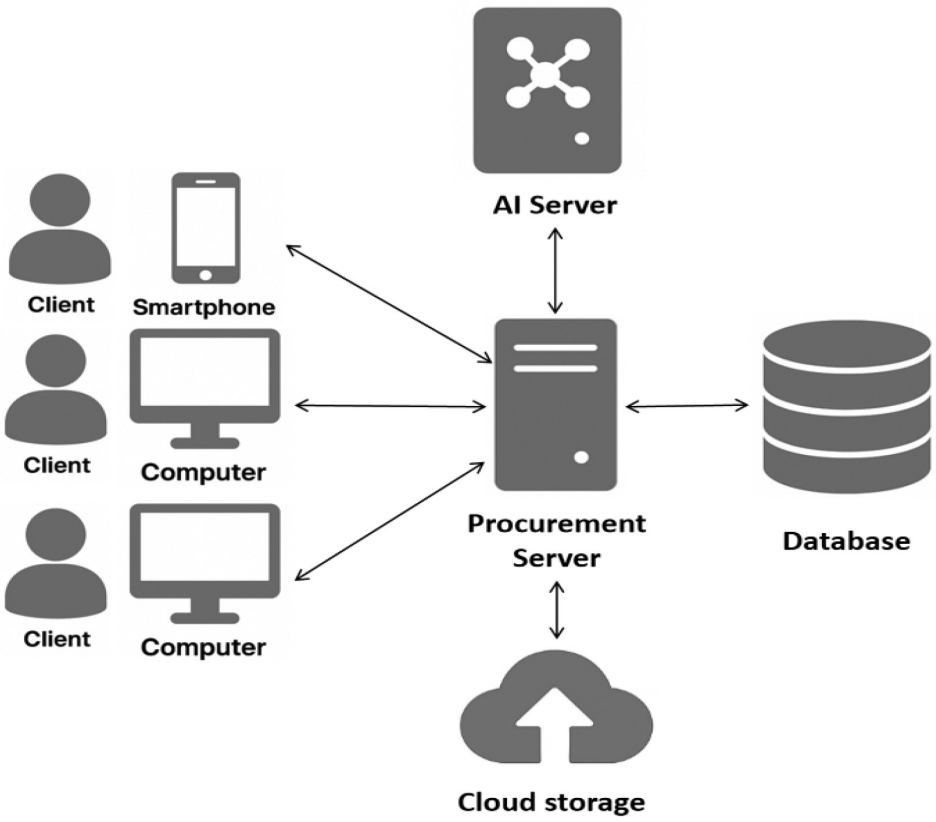


Рис. 1. Архітектура «клієнт-сервер» з незалежними серверами

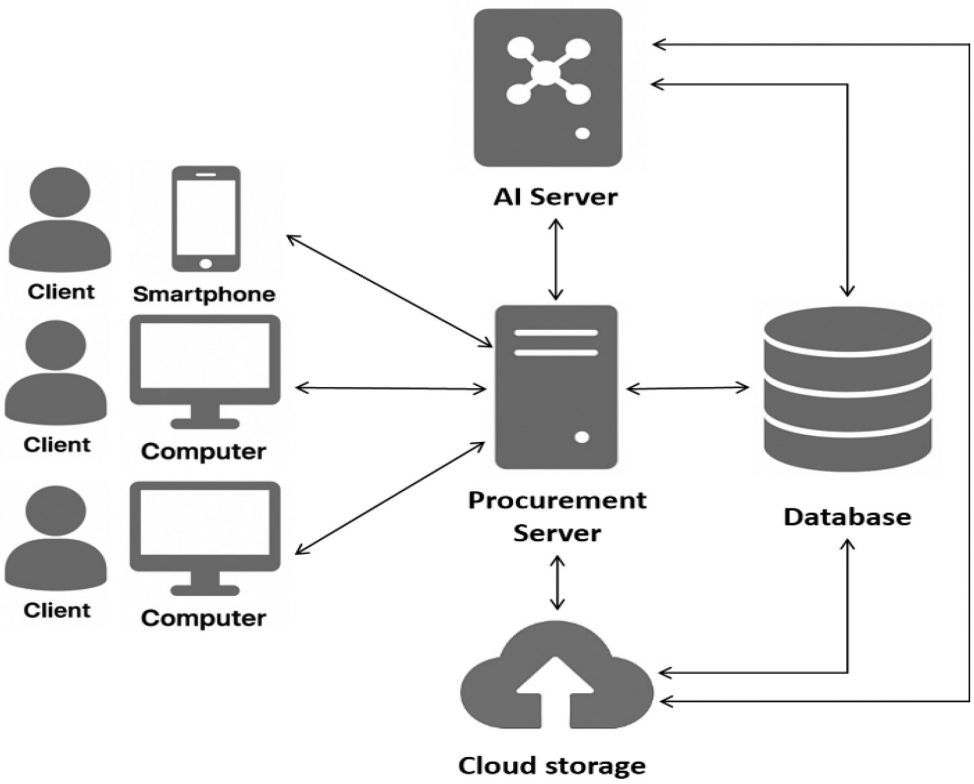


Рис. 2. Архітектура «клієнт-сервер» з взаємодіючими серверами

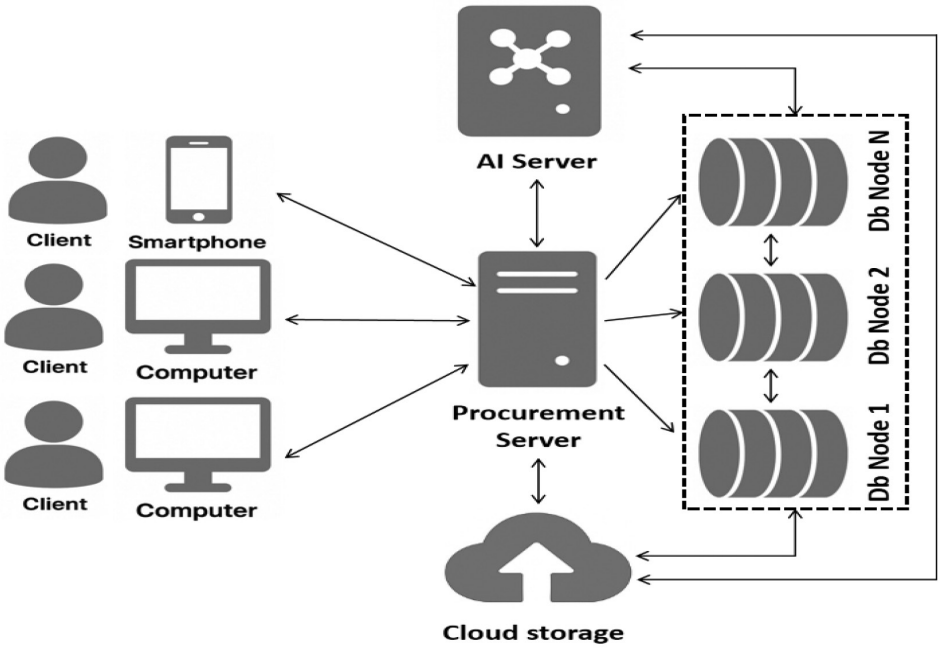


Рис. 3. Змішана (гібридна) архітектура

контроль, водночас використовуючи хмарні рішення для незначущих запитів і забезпечення масштабованості [7, с. 25–26].

Обґрунтування вибору СУБД щодо використання в системах управління закупівель великих B2B-компаній.

1) **Oracle Database** – одна з провідних СУБД, оптимізована для хмарного середовища та здатна працювати на одному або кількох серверах. Вона ефективно обробляє масиви даних до сотень мільярдів записів. Завдяки grid-архітектурі, фізичні зміни в структурі не впливають на логічний доступ користувачів, що забезпечує гнучкість та високу швидкодію. Oracle вирізняється надійною системою безпеки: транзакції ізольовані, підтримується контроль доступу, аудит та адміністрування. Переваги: інноваційність, широкі функціональні можливості, постійна підтримка. Недоліки: висока вартість ліцензії та значні вимоги до апаратного забезпечення. Підходить для великих компаній із високими вимогами до продуктивності та безпеки.

2) **MySQL** – одна з найпопулярніших відкритих реляційних СУБД, широко використовується у веб-розробці, особливо на Linux-серверах. Переваги: безкоштовна для базового використання, має хорошу документацію, підтримує численні інтерфейси, легко інтегрується з іншими СУБД (DB2, Oracle). Недоліки: складне налаштування деяких простих операцій, відсутність підтримки XML (eXtensible Markup Language) і OLAP (Online Analytical Procession). Найбільш підходить для малих і середніх компаній, що розробляють веб-додатки з високими вимогами до швидкості доступу та простоти розгортання.

3) **Microsoft SQL Server** – потужна СУБД з підтримкою гібридної архітектури (хмара + локальні сервери), з 2016 року сумісна з Linux. Має функцію dynamic data masking для захисту конфіденційної інформації. Переваги: простота використання, стабільність під навантаженням, розвинені інструменти моніторингу, інтеграція з Power BI, Azure, SharePoint. Недолік – висока вартість ліцензій. Рекомендована для великих організацій, особливо тих, що вже працюють в екосистемі Microsoft.

4) **PostgreSQL + Citus** – розширення до PostgreSQL, яке перетворює її на розподілену СУБД з горизонтальним масштабуванням. Працює на основі шардінгу таблиць і автоматично розподіляє дані між вузлами кластера. Підходить для OLTP (Online Transaction Processing) і аналітичних навантажень у режимі реального часу. Переваги: розподілена архітектура, сумісність з PostgreSQL, відкритий код, підтримка реплікації, висока доступність, ефективна робота з великими обсягами даних. Недоліки: складність конфігурації при нестандартних сценаріях, потреба у глибшому адмініструванні, обмеження на деякі SQL-операції (Structured Query Language) в розподілених таблицях. Оптимальний варіант для середніх і великих компаній, які потребують масштабованої, надійної та доступної системи з гнучкою структурою.

5) **MongoDB** – одна з провідних NoSQL-СУБД (Not Only SQL), побудована на документоорієнтованій моделі з використанням формату BSON (Binary JavaScript Object Notation). Підтримує зберігання різноструктурованих документів в одній колекції, що забезпечує гнучкість моделювання даних без нормалізації. Ключові переваги: горизонтальне масштабування (шардінг), багатодокументні транзакції (від версії 4.0), реплікація з автоматичним перемиканням при збоях, підтримка багатьох мов програмування. MongoDB ефективна для систем, що працюють

з великими обсягами різнорідних даних, зокрема у сфері закупівель, де потрібна масштабованість, гнучкість та висока доступність.

6) **MariaDB** – сучасна СУБД з відкритим кодом, створена як форк MySQL, повністю сумісна з нею за синтаксисом і API (Application Programming Interface). Переваги: підтримка кількох рушіїв зберігання (InnoDB, Aria, XtraDB тощо), гнучка архітектура, розширювана система плагінів, розвинене шифрування, активна підтримка спільноти, висока швидкість розвитку. Підтримує інструменти продуктивності й логування, що полегшує адміністрування. Оптимальний вибір для проєктів, яким потрібна більша гнучкість, ніж надає MySQL.

7) **IBM DB2** – високопродуктивна СУБД, яка поєднує реляційні можливості з обробкою JSON (JavaScript Object Notation) та XML, що дозволяє працювати з різними типами даних. Працює на Windows, Linux, Unix; має гібридні варіанти розгортання. Переваги: автоматизований багатофазовий оптимізатор SQL-запитів, технологія Blu Acceleration для роботи з великими даними, висока надійність і масштабованість. Недолік – висока вартість ліцензії та обслуговування. Рекомендована для великих організацій із високими вимогами до продуктивності та аналітики.

8) **SAP HANA** – високопродуктивна СУБД з in-memory архітектурою та стовпчиковим зберіганням, що забезпечує обробку великих обсягів даних у реальному часі. Поєднує функції OLTP і OLAP, підтримує SQL, працює з даними SAP і сторонніми джерелами. Переваги: висока швидкодія, масштабованість, інтеграція з BI-інструментами (Business Intelligence tools), стиснення даних, аналітика в реальному часі. Недолік – підтримка лише сертифікованого обладнання, що збільшує вартість впровадження. Рекомендована для великих компаній із високими аналітичними навантаженнями та необмеженим IT-бюджетом.

Висновки

В умовах зростаючих вимог до інформаційної безпеки, гнучкості та масштабованості корпоративних IT-систем, розподілені бази даних демонструють високий потенціал як архітектурне рішення для підрозділів закупівель у B2B-секторі. Рекомендовано архітектуру розподіленої бази даних реалізувати за змішаною (гібридною) моделлю, яка поєднує локальне та хмарне зберігання. Зокрема, для збереження неструктурованих даних (медіафайлів, документів) використовується Azure Blob Storage, що забезпечує масштабованість, георедундантність та швидкий доступ. Основні структуровані дані, включно з транзакційною інформацією, будуть зберігатися у локальній інсталяції PostgreSQL, масштабованій за допомогою розширення Citus, що забезпечує розподілений підхід до обробки запитів, або Microsoft SQL Server, якщо екосистема Microsoft. Такий підхід дозволяє оптимізувати продуктивність і витрати, забезпечуючи при цьому гнучкість у зберіганні та доступі до даних у межах сучасної розподіленої архітектури.

Список використаної літератури

1. Берко А. Ю., Верес О. М., Пасічник В. В. Системи баз даних та знань. Кн. 2: Системи управління базами даних та знань: навч. посіб. Львів : Магнолія–2006, 2021. 584 с.

2. Постніков О. О. Баланс між прозорістю та безпекою в управлінні державними закупівлями в кризових ситуаціях. Проблеми системного підходу в економіці. 2024. С. 51–59. DOI: 10.32782/2520-2200/2024-2-7

3. Швайко М. Л. Трансформація системи публічних закупівель і фінансів в умовах цифровізації: у чому ризики і шанси для економічного відновлення України під час війни? Актуальні проблеми державного управління. 2024. № 2(65). С. 165–186. DOI: 10.26565/1684-8489-2024-2-09

4. Althabatah A., Yaqot M., Menezes B., Kerbache L. Transformative procurement trends: integrating Industry 4.0 technologies for enhanced procurement processes. Logistics. 2023. Vol. 7, № 3. Is. 63. C. 1–21. DOI: 10.3390/logistics7030063. (дата звернення: 22.05.2025).

5. Herold S., Heller J., Rozemeijer F., Mahr D. Dynamic capabilities for digital procurement transformation: a systematic literature review. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. 2023. Vol. 53, № 4. P. 424–447. DOI: 10.1108/IJPDLM-12-2021-0535

6. Bender B., Bertheau C., Körppen T. et al. A proposal for future data organization in enterprise systems – an analysis of established database approaches. Information Systems and e-Business Management. 2022. Vol. 20. P. 441–494. DOI: 10.1007/s10257-022-00555-6

7. Ярцев В. П. Розподілені бази даних: навч. посіб. Київ: ДУТ, 2018. 97 с.

8. Фісун М. Т., Дворецький М. Л., Дворецька С. В. Побудова моделей для оптимізації структури бази даних вузла у корпоративних інформаційних системах. ІТКІ. 2020. № 48, вип. 2. С. 52–60. DOI: 10.31649/1999-9941-2020-48-2-52-60

References

1. Berko A. Yu., Veres O. M., Pasichnyk V. V. (2021) Systemy baz danykh ta znan. Kn. 2: Systemy upravlinnia bazamy danykh ta znan: navchalnyi posibnyk [Database and knowledge systems. Book 2: Database and knowledge management systems: textbook]. Lviv : Mahnoliia–2006. 584 p. [in Ukrainian]

2. Postnikov O. O. (2024) Balans mizh prozoristiu ta bezpekoiu v upravlinni derzhavnymy zakupivliamy v kryzovykh sytuatsiiakh [Balance between transparency and security in public procurement management in crisis situations]. *Problems of the system approach in economics*, pp. 51–59. DOI: 10.32782/2520-2200/2024-2-7 [in Ukrainian].

3. Shvaiko M. L. (2024) Transformatsiia systemy publichnykh zakupivel i finansiv v umovakh tsyfrovizatsii: u chomu ryzyky i shansy dlia ekonomichnoho vidnovlennia Ukrainy pid chas viiny? [Transformation of the public procurement and finance system under digitalization: risks and opportunities for Ukraine's economic recovery during war?]. *Current Issues of Public Administration*, no. 2(65), pp. 165–186. DOI: 10.26565/1684-8489-2024-2-09 [in Ukrainian].

4. Althabatah A., Yaqot M., Menezes B., Kerbache L. (2023) Transformative procurement trends: integrating Industry 4.0 technologies for enhanced procurement processes. *Logistics*, vol. 7, no. 3, iss. 63, pp. 1–21. DOI: 10.3390/logistics7030063 (date of access: 22.05.2025).

5. Herold S., Heller J., Rozemeijer F., Mahr D. (2023) Dynamic capabilities for digital procurement transformation: a systematic literature review. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 53, no. 4, pp. 424–447. DOI: 10.1108/IJPDLM-12-2021-0535

6. Bender B., Bertheau C., Körppen T. et al. (2022) A proposal for future data organization in enterprise systems – an analysis of established database approaches. *Information Systems and e-Business Management*, vol. 20, pp. 441–494. DOI: 10.1007/s10257-022-00555-6

7. Yartsev V. P. (2018) Rozpodileni bazy danykh: navchalnyi posibnyk [Distributed databases: textbook]. Kyiv : DUT. 97 p. [in Ukrainian]

8. Fisun M. T., Dvoretskyi M. L., Dvoretska S. V. (2020) Pobudova modelei dlia optymizatsii struktury bazy danykh vuzla u korporatyvnykh informatsiinykh systemakh [Model building for optimizing the node database structure in corporate information systems]. ITKI, no. 48, iss. 2, pp. 52–60. DOI: 10.31649/1999-9941-2020-48-2-52-60

УДК 004.42.519.8 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.34

Б. В. ПАШКОВСЬКИЙ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0003-1082-6837

АВТОМАТИЧНИЙ ПРОЦЕС ВИЗНАЧЕННЯ ДІЛЯНОК ТА МІСЦЬ КОНЦЕНТРАЦІЇ ДОРОЖНЬО-ТРАНСПОРТНИХ ПРИГОД НА ТЕРИТОРІЇ ІВАНО-ФРАНКІВСЬКОЇ МІСЬКОЇ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ

У статті розглядається актуальна проблема підвищення рівня аварійності на дорогах України, зокрема значне зростання кількості дорожньо-транспортних пригод (ДТП) із загиблими та травмованими у 2024 році, порівняно з попереднім роком. Згідно з офіційною статистикою, понад 37 % загиблих становлять пішоходи та велосипедисти, що є найвразливішими учасниками дорожнього руху. Основними причинами аварій виступають перевищення швидкості, порушення правил маневрування та проїзду перехресть. У таких умовах надзвичайно важливим є ефективне виявлення місць концентрації ДТП, що дозволить зосередити заходи безпеки саме на проблемних ділянках.

Автори досліджують сучасні підходи до виявлення аварійно-небезпечних ділянок із використанням інформаційних технологій. Зокрема, запропоновано метод автоматизованої кластеризації ДТП на основі їхніх географічних координат із застосуванням формули гаверсинуса для обчислення відстаней між подіями. Розроблений алгоритм дозволяє враховувати низку важливих параметрів: наявність міського середовища, період здійснення ДТП, мінімальну кількість випадків у кластері тощо.

В межах дослідження реалізовано REST API та веб-застосунок на базі технологій ASP.NET Core і Google Maps API, який забезпечує інтерактивну візуалізацію та фільтрацію аварій. Користувач має змогу здійснювати пошук кластерів за роком, погодними умовами, станом покриття, залученістю пішоходів чи велосипедистів, наявністю загиблих тощо. Це дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо підвищення безпеки руху в конкретних районах.

Запропоноване рішення усуває недоліки попередніх підходів, заснованих на використанні Excel та мови VBA, які обмежували можливості автоматизації та інтеграції з сучасними цифровими платформами. Натомість реалізований підхід є масштабованим, зручним для подальшого розвитку та інтеграції з муніципальними або державними системами управління дорожнім рухом.

Ключові слова: *дорожньо-транспортна пригода, місце концентрації ДТП, кластеризація, географічні координати, безпека руху, автоматизація, ASP.NET, Haversine, візуалізація, фільтрація даних.*

B. V. PASHKOVSKYI
Candidate of Technical Science,
Associate Professor at the Department of Computer Systems and Networks
Ivano-Frankivsk Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0003-1082-6837

AUTOMATED PROCESS OF DETERMINING AREAS AND PLACES OF CONCENTRATION OF ROAD AND TRANSPORT ACCIDENTS IN THE URBAN TERRITORIAL COMMUNITY OF IVANO-FRANKIV

This article examines the pressing issue of increasing road traffic accident (RTA) rates in Ukraine, particularly the sharp rise in accidents involving fatalities and injuries in 2024 compared to previous years. According to national statistics, over 37 % of traffic-related fatalities are vulnerable road users such as pedestrians and cyclists. The most frequent causes of accidents include speeding, improper maneuvers, and violations of intersection rules. In light of these challenges, the identification of accident concentration areas is vital for improving road safety and allocating resources effectively.

The authors propose a modern, automated approach to detecting accident-prone areas based on geospatial clustering of RTAs. The method uses the Haversine formula to calculate geographic distances between individual accidents and groups them into clusters based on configurable parameters such as proximity, number of incidents, presence in an urban area, and time range.

A web application and REST API were developed using ASP.NET Core and Google Maps JavaScript API to visualize clusters and allow users to filter data by year, road conditions, lighting, weather, involvement of vulnerable users, and presence of fatalities. This platform provides an interactive and data-driven means of identifying high-risk zones.

The approach overcomes limitations of earlier methods that relied on Excel and outdated scripting languages like VBA, which restricted scalability and integration with modern web and mobile solutions. The implemented system is extensible, allowing for integration with municipal traffic monitoring systems or national road safety platforms. This facilitates

more timely, data-informed decision-making and proactive safety measures, especially in areas with high concentrations of vulnerable road users.

Key words: *road traffic accident, accident cluster, road safety, geographic information system, clustering algorithm, Haversine, ASP.NET Core, visualization, data filtering, geolocation.*

Постановка проблеми

Згідно зі статистикою Департаменту патрульної поліції [1] у 2024 році сталося 25 781 ДТП загиблими чи травмованими (що на 9 % більше ніж у 2023 році), в яких загинули 3 202 людини (що на 4.9 % більше ніж в 2023 році)

Понад 37 % серед загиблих на дорогах – найвразливіші учасники дорожнього руху: пішоходи та велосипедисти. Водночас, більшість ДТП сталися з вини водіїв.

Найпоширенішими причинами аварій пригод були:

– перевищення безпечної та встановленої швидкості (10 163 ДТП);
– порушення правил маневрування (5735 ДТП);
– порушення правил проїзду перехресть (2444 ДТП).

Загалом, більш ніж половина смертельних ДТП на дорогах України сталися через перевищення безпечної та встановленої швидкості.

Відповідно до порядку виявлення аварійно-небезпечних ділянок та місць концентрації дорожньо-транспортних пригод [2] орган управління щороку до 15 березня здійснює виявлення місць (ділянок) концентрації ДТП та аварійно-небезпечних ділянок станом на 31 грудня попереднього календарного року. Органи управління отримують інформацію стосовно ДТП засобами єдиної інформаційної системи МВС або від органу (підрозділу) Національної поліції на підставі запиту протягом 30 днів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Автори [3] вирішують дану задачу використовуючи програмне забезпечення Excel із макросами з використанням мови програмування VBA (Visual Basic for Application).

Проте даних підхід має ряд недоліків:

– Мова VBA застаріла і не має такої гнучкості, як сучасні мови програмування
– Використання книги Excel як сховища даних унеможливлює використання сховища, як основного у веб та мобільних застосунках
– Відсутня можливість автоматизованої корекції координат ДТП у випадку неточного відпрацювання геокодингу, через некоректно введену адресу ДТП.

Автори [4] вихідні дані перетворили в зручний для подальшої обробки вигляд з використанням мови програмування C# та занесли у реляційну базу даних. Реалізували REST API з використання ASP.NET та Entity Framework Core для можливості використання даних будь-якими веб та мобільними застосунками. З метою виявлення місць концентрації дорожньо-транспортних пригод провели кластеризацію дорожньо-транспортних пригод на карті. Розроблено веб-застосунок та проведено візуалізацію пригод, шляхом нанесення їх на карту з використання сервісу Google Maps Javascript API. Реалізували можливість фільтрації ДТП за роком вчинення, станом покриття, освітленістю, погодних умов, наявністю штучних споруд, залученістю пішоходів чи велосипедистів, наявністю загиблих чи важко травмованих, тощо. Провели статистичний аналіз кількості ДТП з загиблими та потерпілими за кожен рік окремо на території міста та ОТГ, проведено аналіз загиблих/важкотравмованих/легкотравмованих малозахищених учасників дорожнього руху (пішоходів та велосипедистів).

Проте досі відсутня система автоматичного визначення місць концентрації ДТП, а поточна кластеризація відбувається в ручному режимі на карті.

Викладення основного матеріалу дослідження

Відповідно до [2]:

ділянка концентрації ДТП:

на автомобільних дорогах загального користування – ділянка автомобільної дороги, на якій протягом трьох попередніх календарних років сталося шість та більше ДТП із загиблими та/або травмованими особами, протяжністю 250 м та більше, за умови, що відстань між сусідніми місцями ДТП не перевищує 150 м у населених пунктах та 300 м – за їх межами;

на вулицях і дорогах міст та інших населених пунктів – частина вулиці між перехрестями з одноманітними умовами руху протяжністю від 50 до 150 м, рівень аварійності на якій відповідає показнику, зазначеному в таблиці оцінювання місць і ділянок концентрації ДТП за ступенем небезпеки для руху транспортного потоку за умови врахування ДТП із загиблими та/або травмованими в населених пунктах

місце концентрації ДТП:

на автомобільних дорогах загального користування – ділянка автомобільної дороги загального користування протяжністю до 250 м, на якій протягом трьох попередніх календарних років сталося чотири та більше ДТП із загиблими та/або травмованими особами;

на вулицях і дорогах міст та інших населених пунктів – обмежені за довжиною ділянки вулиць або доріг (до 50 м), перехрестя, зупинки пасажирського транспорту загального користування, пішохідні переходи, залізничні переїзди, штучні споруди та інші елементи вулично-дорожньої мережі, рівень аварійності на яких відповідає показнику, зазначеному в таблиці оцінювання місць і ділянок концентрації ДТП за ступенем небезпеки для руху транспортного потоку за умови врахування ДТП із загиблими та/або травмованими в населених пунктах.

Таким чином, постає задача автоматизованого групування точок здійснення дорожньо-транспортних пригод (ДТП) з урахуванням ряду ключових параметрів, що впливають на ймовірність виникнення аварійно-небезпечних ділянок. Зокрема, до таких параметрів належать:

Distance – максимальна допустима відстань між точками фіксації ДТП, що визначає просторову близькість для об'єднання їх у кластер;

City – булевий індикатор, який вказує на наявність населеного пункту в місці події (міські умови);

Year та YearTo – часовий інтервал, в межах якого здійснено ДТП;

Count – мінімальна кількість подій у кластері, яка визначає ступінь аварійної концентрації.

Наприклад, для ідентифікації кластерів з низьким рівнем аварійності на території м. Івано-Франківська відповідно до вимог Додатку 1 [2], доцільно встановити такі значення параметрів:

Distance = 50 м,

City = true,

Year = 2023,

YearTo = 2025,

Count = 3–4.

Для класифікації кластерів із середнім та високим рівнем небезпеки, значення параметра Count слід відповідно підвищити до 5–7 та ≥8.

Для обчислення просторової відстані між точками за їх географічними координатами використовується формула гаверсинуса, що дозволяє з урахуванням кривизни поверхні Землі забезпечити достатню точність при визначенні відстаней між ДТП у сферичних координатах.

$$d = 2r\arcsin\left(\sqrt{\text{haversin}(\phi_2-\phi_1)+\cos(\phi_1)+\cos(\phi_1)\cos(\phi_2)\,\text{haversin}(\lambda_2-\lambda_1)}\right)=$$

$$=2r\arcsin\left(\sin^2\left(\frac{\phi_2-\phi_1}{2}\right)+\cos(\phi_1)\cos(\phi_2)\sin^2\left(\frac{\lambda_2-\lambda_1}{2}\right)\right).$$

Для фільтрації ДТП по місту та даті застосуємо наступний запит.

```
var accidents = await _komunalkaContext.Accidents
   .Where(a => !city || a.Address.City == «Івано-франківськ»)
   .Where(a => a.Timestamp.Year >= year && a.Timestamp.Year <= yearTo)
      .ToListAsync().ConfigureAwait(false);
```

Вихідний код алгоритму кластеризації знаходиться за адресою https://github.com/bpashkovskyi/Komunalka/blob/master/Accidents.Web/Clusterization.cs

Алгоритм кластеризації у цьому коді виконує групування об'єктів Accident у кластери за географічною відстанню між ними.

```
public static List<Cluster> Clusterize(List<Accident> accidents, int dist, int count)
```

Вхідні параметри:

– accidents: список подій (аварій) з координатами.
– dist: максимальна відстань (у метрах) для включення події до кластера.
– count: мінімальна кількість подій у кластері, щоб вважати його валідним.

Крок 1: Формування початкових кластерів

Для кожної події accident:

– Створюється новий об'єкт Cluster.
– Перебираються всі інші події accident2, що мають інший Id.
– Обчислюється відстань між ними за формулою **гаверсинуса** (на основі координат).
– Якщо відстань менша за dist, accident2 додається до поточного кластеру.
– Якщо кластер має щонайменше count елементів – додається до загального списку кластерів.

Крок 2: Об'єднання кластерів (MergeClusters)

– Кластери перевіряються попарно.

– Якщо два кластери мають хоча б одну спільну аварію (HasMatch) – вони зливаються (Merge), а один із них позначається як Removed.

Крок 3: Фільтрація результатів

– Повертаються лише ті кластери, які **не були видалені** (Removed == false).

Пояснення допоміжних методів:

– HaversineDistance – обчислює геодезичну відстань між двома точками на поверхні Землі.
– ToRadians – допоміжна функція для конвертації градусів у радіани.
– HasMatch – перевіряє, чи два кластери мають спільні аварії (за Id).
– Merge – додає всі унікальні події з іншого кластеру до поточного.

Алгоритм кластеризує аварії за принципом:

– Якщо вони знаходяться на відстані меншій за dist.
– І таких аварій у групі не менше count.
– Після чого об’єднує ті кластери, які перетинаються по елементах.

Розглянемо приклад виконання програми з параметрами:
Distance – 50
City – true
Year – 2023
YearTo – 2025
Count – 4
Для цього перейдемо за посиланням:
https://dtp.if.ua/report?dist=50&city=true&year=2023&yearto=2025&count=4
Отримаємо 6 місць концентрації ДТП зі списком ДТП у кожному (рис. 1–3).
Місця 4–6 можна переглянути за посиланням вище.

№	Дата	Місто	Вулиця	Додаткова привязка	Тип	Чи є МК ДТП (згідно УПП)
1	2/19/2024 2:19 PM	Івано-франківськ	Галицька	Пулюя	Наїзд на пішохода - на нерегульованому пішохідному переході	
2	10/18/2024 9:50 AM	Івано-франківськ	Галицька	Пулюя	Наїзд на пішохода - на нерегульованому пішохідному переході	
3	11/5/2024 7:15 PM	Івано-франківськ	Галицька	56	Наїзд на пішохода - на нерегульованому пішохідному переході	
4	8/2/2024 6:30 PM	Івано-франківськ	Галицька	56 - пулюя	Зіткнення бокове	
5	10/22/2024 7:30 AM	Івано-франківськ	Галицька	56, перехрестя з вул пулюя	Зіткнення з задньою частиною тз	
6	3/27/2023 9:01 PM	Івано-франківськ	Галицька	Пулюя	Наїзд на велосипедиста - велосипедист рухався у попутному напрямку	True

Рис. 1. Місце концетрації ДТП

№	Дата	Місто	Вулиця	Додаткова привязка	Тип	Чи є МК ДТП (згідно УПП)
1	8/28/2023 7:34 PM	Івано-франківськ	Євгена коновальця	Буд. 142	Наїзд на пішохода - на нерегульованому пішохідному переході	False
2	11/18/2023 5:15 PM	Івано-франківськ	Євгена коновальця	221	Наїзд на пішохода - на регульованому пішохідному переході	False
3	9/29/2024 8:30 PM	Івано-франківськ	Євгена коновальця	Буд. 142	Наїзд на пішохода - на нерегульованому пішохідному переході	
4	7/4/2024 7:30 PM	Івано-франківськ	Євгена коновальця	142	Наїзд на велосипедиста - поза межами велосипедної доріжки	
5	3/10/2023 7:30 PM	Івано-франківськ	Євгена коновальця	221	Зіткнення з задньою частиною тз	False

Рис. 2. Місце концентрації ДТП

№	Дата	Місто	Вулиця	Додаткова привязка	Тип	Чи є МК ДТП (згідно УПП)
1	6/11/2023 5:50 PM	Івано-франківськ	Надрічна	Максимовича 15	Зіткнення з задньою частиною тз	False
2	11/2/2023 6:18 PM	Івано-франківськ	Надрічна	Буд. 48	Зіткнення бокове	False
3	3/11/2024 4:30 PM	Івано-франківськ	Надрічна	Біля максимовича 12 азс окко	Зіткнення бокове	
4	6/6/2024 2:19 PM	Івано-франківськ	Надрічна	Буд. 48	Зіткнення бокове	
5	5/10/2024 8:40 AM	Івано-франківськ	Надрічна	Пер. з вул. максимовича	Зіткнення бокове	
6	3/31/2023 9:23 AM	Івано-франківськ	Надрічна	Буд. 48	Зіткнення бокове	False

Рис. 3. Місце концентрації ДТП

Висновки

У результаті дослідження розроблено ефективний алгоритм кластеризації дорожньо-транспортних пригод на основі географічних координат, що враховує просторову близькість, рік вчинення ДТП, наявність населеного пункту та кількість випадків. Реалізований підхід дозволяє автоматизувати процес виявлення місць концентрації ДТП, що раніше виконувався вручну. Застосування такого рішення дозволить оперативніше реагувати на загрози безпеці дорожнього руху, здійснювати обґрунтоване планування інфраструктурних змін та зменшити кількість аварій, особливо за участі вразливих учасників дорожнього руху.

Список використаної літератури

1. Статистика ДТП в Україні за 2024 рік. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://patrolpolice.gov.ua/wp-content/uploads/2025/01/12.2024.xlsx

2. Про затвердження Порядку виявлення аварійно-небезпечних ділянок та місць концентрації дорожньо-транспортних пригод (Наказ Міністерства Інфраструктури України) № 598. (2022). [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1313-22#Text

3. Пашковський Богдан, Слабінога Мар'ян. Автоматизація процесу визначення ділянок та місць концентрації дорожньо-транспортних пригод на території Івано-Франківської міської територіальної громади з використанням геокодування. International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 2, No. 4, 2023, pp. 9–18. doi: 10.46299/j.isjea.20230204.02

4. Удосконалення автоматизованого процесу визначення ділянок та місць концентрації дорожньо-транспортних пригод на території Івано-Франківської Міської Територіальної Громади. Б. В. Пашковський, М. О. Слабінога. Вісник Херсонського національного технічного університету № 2(89), 2024. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.29

References

1. Statystyka DTP v Ukrajini za 2024 rik.. [Electronic resource]. Access mode: https://patrolpolice.gov.ua/wp-content/uploads/2025/01/12.2024.xlsx

2. Pro zatverdzhennja Porjadku vyjavlennja avarijno-nebezpechnykh diljanok ta miscj koncentraciji dorozhnjo-transportnykh pryghod (Nakaz Ministerstva Infrastruktury Ukrajiny) #598. (2022). Access mode: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1313-22#Text

3. Bohdan Pashkovsky, Maryan Slabinoga. (2023) Avtomatyzacija procesu vyznachennja diljanok ta miscj koncentraciji dorozhnjo-transportnykh pryghod na terytoriji Ivano-Frankivsjkoji misjkoji terytorialjnoji ghromady z vykorystannjam gheokoduvannja.. International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 2, No. 4, 2023, pp. 9–18. doi: 10.46299/j.isjea.20230204.02

4. Pashkovskyi, B. V., & Slabinoga, M. O. (2024). Udoskonalennia avtomatyzovanoho protsesu vyznachennia diliatok ta mist′ kontsentratsii dorozhn′o-transportnykh pryhod na terytorii Ivano-Frankivskoi Miskoi Terytorialnoi Hromady. *Visnyk Khersonskoho natsional'noho tekhnichnoho universytetu*, no. 2(89). https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.29

УДК 004.4 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.35

М. ПИЛИПЧУК
магістр кафедри комп'ютерних наук
Західноукраїнський національний університет
ORCID: 0009-0000-7846-9413

Н. П. ПОРПЛИЦЯ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерних наук
Західноукраїнський національний університет
ORCID: 0000-0003-3624-275X

І. С. СТАСІВ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерних наук
Західноукраїнський національний університет
ORCID: 0000-0003-4181-3916

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДОСТУПНОСТІ ВЕБ-КОНТЕНТУ ДЛЯ ЛЮДЕЙ З ВАДАМИ ЗОРУ

У статті розглядається проблема впровадження сучасних принципів цифрової інклюзивності до цифрового веб-контенту. Показано, що ключовим фактором, що впливає на доступність веб-ресурсу для людей з вадами зорового сприйняття є рівень контрастності його веб-сторінок та їх наповнення, включаючи й елементи графічного інтерфейсу користувача. Запропоновано оригінальний підхід до автоматизованого аналізу контрастності веб-контенту, відповідно до вимог стандарту WCAG 2.1 без доступу DOM-структури чи HTML-коду веб-сторінки, а з використанням її графічних зображень. Для його програмної реалізації було використано такі популярні інструменти: Python, OpenCV та Tesseract OCR. Для підвищення швидкодії розроблюваного програмного забезпечення, в його основу було закладено принципи паралельних обчислень для розподіленої обробки виділених блоків тексту між кількома потоками. Для цього було використано бібліотеку concurrent.futures, яка дозволяє створювати потоки, що паралельно обробляють різні частини зображення, у яких було ідентифіковано текст. Розроблений модуль продемонстрував здатність ефективно аналізувати контрастність елементів веб-сторінок без доступу до їх DOM-структури, що робить його придатним для автоматизованого аудиту доступності зображень, PDF-документів, веб-інтерфейсів та інших графічних елементів. Це було підтверджено під час тестування розробленого програмного модуля на ряді реальних веб-сайтів, наприклад, веб-ресурс Medium (режим доступу: https://medium.com/). Також було проведено порівняльне тестування розробленого модуля з відомими аналогами, зокрема, Google Vision API, Adobe Acrobat OCR та Tesseract + Custom Scripts та проведено аналіз його результатів. Тестування було проведено із використанням вибірки, що складалася із різнотипних зображень різних розмірів за такими критеріями: час обробки зображень, точність визначення текстових блоків і контрастності, стабільність роботи.

Ключові слова: *інклюзивність цифрового контенту, WCAG, аналіз контрастності, програмний продукт, паралельна архітектура, хмарні обчислення, управління проєктом.*

M. PYLYPCHUK
Master at the Department of Computer Science
West Ukrainian National University
ORCID: 0009-0000-7846-9413

N. P. PORPLYTSYA
Associate Professor at the Department of Computer Science
West Ukrainian National University
ORCID: 0000-0003-3624-275X

I. S. STASIV
Associate Professor at the Department of Computer Science
West Ukrainian National University
ORCID: 0000-0003-4181-3916

SOFTWARE TOOL FOR WEB CONTENT ACCESSIBILITY ANALYSIS FOR VISUALLY IMPAIRED USERS

The article addresses the issue of implementing modern principles of digital inclusivity in web content. It is shown that a key factor affecting the accessibility of a web resource for people with visual impairments is the contrast level of its web pages and their content, including elements of the graphical user interface. An original approach is proposed for automated contrast analysis of web content in accordance with the Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1 standard, without accessing the Document Object Model (DOM) structure or HTML code of the web page, using only its graphical representation. To implement this approach, the following popular tools were used: programming language Python, OpenCV, and Tesseract Optical Character Recognition. To improve the performance of the developed software, principles of parallel computing were implemented at its core to enable distributed processing of designated text blocks across multiple threads. For this purpose, the concurrent.futures library was used, allowing the creation of threads that process different parts of the image – where text has been identified – in parallel. The developed module demonstrated its ability to effectively analyze the contrast of web page elements without access to their DOM structure, making it suitable for automated accessibility audits of images, PDF documents, web interfaces, and other graphical elements. This was confirmed during testing of the module on several real websites, such as the Medium platform (access mode: https://medium.com/). Comparative testing was also conducted between the developed module and well-known alternatives, including Google Vision API, Adobe Acrobat OCR, and Tesseract with custom scripts. The results were analyzed based on a dataset consisting of various types of images of different sizes, according to the following criteria: image processing time, accuracy of text block and contrast detection, and operational stability.

Key words: *digital content inclusivity, Web Content Accessibility Guidelines, contrast analysis, software product, parallel architecture.*

Постановка проблеми

Доступність інформаційного контенту є важливим аспектом для реалізації ергономічних веб-ресурсів, зокрема, коли це стосується користувачів з вадами зору. Як відомо, базовим критерієм візуальної доступності інформаційного контенту для таких користувачів є забезпечення належного рівня контрастності між текстом та фоном, адже саме це безпосередньо впливає на здатність користувача сприймати, читати й інтерпретувати інформацію. Сьогодні існують вже чітко означені вимоги, щодо критеріїв доступності інформаційного контенту для людей з інвалідністю, вони розроблені міжнародною організацією W3C та подані у стандарті WCAG 2.1 (Web Content Accessibility Guidelines) [11, 12]. Однак, незважаючи на існування таких стандартів, багато веб-сайтів і досі не відповідають встановленим нормам через складність їхнього впровадження або недостатню обізнаність розробників. Традиційні методи оцінки контрастності, такі як використання онлайн-інструментів (наприклад, WAVE, axe, Lighthouse), часто вимагають втручання людини або мають обмеження у визначенні тексту, який є частиною зображень [2, 5]. Крім того, багато таких інструментів базуються саме на використанні хмарних обчислень, залежних від зовнішніх ресурсів, що суттєво впливає на вартість їх застосування. Особливо, якщо масштабувати застосування такого ресурсу для аналізу великої кількості існуючих веб-ресурсів та з урахуванням стрімкого оновлення їх контенту. Саме тому, розробка програмного рішення на основі методів комп'ютерного зору із застосуванням паралельних обчислень є перспективним напрямом досліджень, що дозволить автоматизувати аналіз контрастності без необхідності доступу до вихідного коду веб-сторінок та дозволить підвищити рівень впровадження сучасних принципів цифрової інклюзивності [3, 4, 6, 7]. Крім того, цей напрям досліджень відповідає практичним потребам розробників програмного забезпечення, які прагнуть автоматизувати аудит доступності зображень, PDF-документів, веб-інтерфейсів та інших графічних елементів [1, 2, 8].

У зв'язку з цим, дана робота присвячена розпаралеленню та оптимізації методу аналізу контрастності тексту на зображеннях, з метою підвищення ефективності й точності систем розпізнавання тексту, що працюють у відповідності з вимогами WCAG 2.1.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останні дослідження у сфері програмного забезпечення для аналізу для перевірки контрастності на веб-контенту показують активний розвиток інструментів, що перевіряють відповідність стандарту WCAG 2.1 [11, 12]. Зокрема, до них належать: Axe-core, WAVE, Google Lighthouse [5]. Однак, усі вони переважно працюють з DOM-структурою веб-сторінок. Водночас, якщо текст відображається динамічно, за допомогою Canvas/WebGL, або має стилі, накладені через JavaScript – ці інструменти можуть не виявити проблему, також вони не враховують «реальне зображення» сторінки, тобто не бачать, як вона виглядає користувачеві, а також вони не можуть застосовуватися для перевірки PDF-документів, скріншотів або веб-програм без доступу до вихідного коду.

Саме тому, актуальною є задача розробки програмного забезпечення, що базується на використанні комп'ютерного зору та OCR (Optical Character Recognition) для аналізу контрастності без залежності від DOM-структури чи HTML-коду.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження полягає у розробці ефективного інструменту для аналізу контрастності тексту на зображеннях (без доступу DOM-структури чи HTML-коду) відповідно до вимог WCAG 2.1, в основу якого буде закладено методи комп'ютерного зору та принципи паралельних обчислень.

Викладення основного матеріалу дослідження

1. Підхід до аналізу контрастності без залежності від DOM-структури чи HTML-коду веб-сторінки

Контрастність у WCAG вимірюється як відношення яскравості кольорів, і є ключовим фактором, що забезпечує читабельність та розпізнаваність веб-контенту, а особливо для користувачів із порушенням зору або дальтонізмом [2, 8, 11, 12].

Контрастність визначається як співвідношення відносної яскравості (luminance) двох кольорів – кольору тексту (L1) та фону (L2). Формально:

$$Contrast\ Ratio = \frac{L_2 + 0.05}{L_1 + 0.05}, \tag{1}$$

де L1 – більша з яскравостей (текст або фон), L2 – менша з яскравостей.

Яскравість кольору обчислюється з RGB-компонентів згідно з формулою:

$$L = 0.2126 \cdot R_{lin} + 0.7152 \cdot G_{lin} + 0.0722 \cdot B_{lin}, \tag{2}$$

де кожен компонент $C_{lin}(R, G, B)$ лінійно перетворюється з sRGB у лінійний RGB за формулою:

$$\begin{cases} \frac{C_{srgb}}{12.92} 3 \\ \left(\frac{C_{srgb} + 0.055}{1.055}\right), \end{cases} \tag{3}$$

де $C_{srgb} \in [0, 1]$, тобто значення кожного кольору в шкалі від 0 до 1.

У цій праці пропонується застосувати ефективне поєднання сучасних методів комп'ютерного зору та інструментів оптичного розпізнавання тексту для аналізу контрастності веб-контенту. Одним із сучасних потужних інструментів комп'ютерного зору, що дозволяє ефективно працювати з зображеннями є бібліотека OpenCV [9, 10]. У контексті аналізу контрастності OpenCV дозволяє: отримати скріншот веб-сторінки у вигляді зображення (наприклад, за допомогою Selenium або Puppeteer) та надає інструменти для обробки цього зображення; дозволяє визначити середній колір тексту та колір фону у кожній такій ділянці; перетворити кольори з формату BGR (або RGB) у яскравість за формулами WCAG та обчислити значення коефіцієнту контрастності.

Розглянемо також Tesseract OCR – це популярний інструмент для оптичного розпізнавання тексту (Optical Character Recognition), що дозволяє ідентифікувати та розпізнавати текст безпосередньо із зображення. Його застосування для аналізу контрастності веб-контенту дозволить автоматично визначати розташування текстових блоків на веб-сторінці, виділяти координати фрагменту зображення, що містить текст, забезпечити ефективну взаємодію з OpenCV для подальшого аналізу кольору в межах ідентифікованого фрагменту зображення. Таким чином, поєднання Tesseract OCR і OpenCV дозволяє реалізувати автоматизований аналіз контрастності, без доступу до HTML-коду чи CSS стилів поточної веб-сторінки. Для реалізації проєкту було використано мову програмування Python.

Комбінація методів комп'ютерного зору дозволяє реалізувати ефективну та масштабовану систему перевірки контрастності, що може працювати із будь-якими веб-сторінками у форматі зображень. Такий підхід може використовуватись для моніторингу державних чи освітніх ресурсів, перевірки дизайну перед запуском або інтеграції в автоматизовані системи тестування доступності.

2. Опис модулів програмної реалізації та аналіз проблемних моментів

Архітектура модуля для автоматичного визначення контрастності веб-контенту побудована з урахуванням потреби в ефективній обробці зображень веб-сторінок, точному визначенні кольорів тексту та фону, а також в обчисленні контрасту між ними. Загальна структура модуля складається з кількох основних складових, кожна з яких виконує специфічну функцію в процесі аналізу контрасту веб-контенту.

Модуль збору даних (Скринінг веб-сторінок): модуль починає свою роботу з отримання доступу до веб-сторінки, яка буде проаналізована. Для цього використовується Selenium, що дозволяє взаємодіяти з веб-браузером для автоматичного збору контенту сторінки. Selenium відкриває веб-сторінку, виконує її рендеринг, а потім робить скріншот, що є важливою частиною підготовки даних для подальшого аналізу.

Модуль обробки зображень (OpenCV): після того, як зображення веб-сторінки отримано, воно передається в компонент обробки зображень. Для цього використовуються бібліотеки OpenCV та Tesseract OCR. OpenCV займається попередньою обробкою зображення: покращенням якості (підвищення контрасту, видалення шумів),

а також сегментацією зображення для виділення тексту та фону. За допомогою цієї бібліотеки можна виділяти області, що містять текст, і підготовляти їх для наступного аналізу.

Модуль аналізу тексту та фону (Tesseract OCR): Tesseract OCR виконує оптичне розпізнавання символів на зображенні. Він розпізнає текстові елементи, які містяться на скріншоті, та надає їх координати та текстові значення. Крім того, Tesseract надає інформацію про розміри блоків тексту, що дозволяє точно визначити межі кожного текстового елементу. Також, проведено оптимізацію самого процесу розпізнавання, зокрема, відповідним чином налаштовано параметри Tesseract для зменшення часу виконання. Наприклад, параметр --psm (Page Segmentation Mode), можне впливати на те, як Tesseract розпізнає текст на зображенні. Наприклад, для документів з одним текстовим блоком можна вибрати відповідний режим, що дозволить зменшити час обробки. А параметр output_type в pytesseract.image_to_data можна встановити на output_type.STRING, щоб обмежити кількість інформації, яка повертається, якщо це не є необхідним. Це також зменшує обсяг обробленої інформації та прискорює роботу.

Загалом, варто відзначити, що застосування попередньої обробки зображення та вибіркової обробки суттєво знижує навантаження на систему та покращує швидкість обробки, зберігаючи точність розпізнавання тексту, особливо при роботі з «великими» зображеннями чи документами.

Модуль аналізу контрасту (Розрахунок контрасту): після того, як текст і фон виділено, наступним кроком є аналіз контрасту між текстом і фоном. Для цього використовується спеціальний алгоритм обчислення контрасту на основі відносної люмінесценції. Визначення контрасту між текстом і фоном здійснюється шляхом порівняння їхніх відтінків, що дає можливість оцінити відповідність стандартам доступності контенту.

Однією з проблем, що виникають при обробці зображень, є послідовне оброблення кожного блоку тексту. У базовій версії програми, кожен блок тексту обробляється по черзі, що може значно збільшувати час виконання при наявності великої кількості текстових елементів. Щоб подолати цю проблему, можна застосувати паралельну обробку, що дозволяє скоротити час виконання програми, розподіляючи навантаження між кількома процесорами або потоками. Для підвищення швидкодії розроблюваного програмного забезпечення було застосовано принципи паралельних обчислень для розподілу обробки блоків тексту між кількома потоками. Для цього було використано бібліотеку concurrent.futures для створення потоків, що паралельно обробляють різні частини зображення.

Зазначимо, що паралельне виконання операцій було застосовано до розпізнавання тексту та визначення областей малюнка, де ідентифіковано текст. Зокрема, алгоритм pytesseract було адаптовано для паралельного виконання на різних частинах зображення, кожна з яких обробляється окремо. Це дозволяє розпізнавати текст у кількох областях зображення одночасно, зменшуючи загальний час обробки.

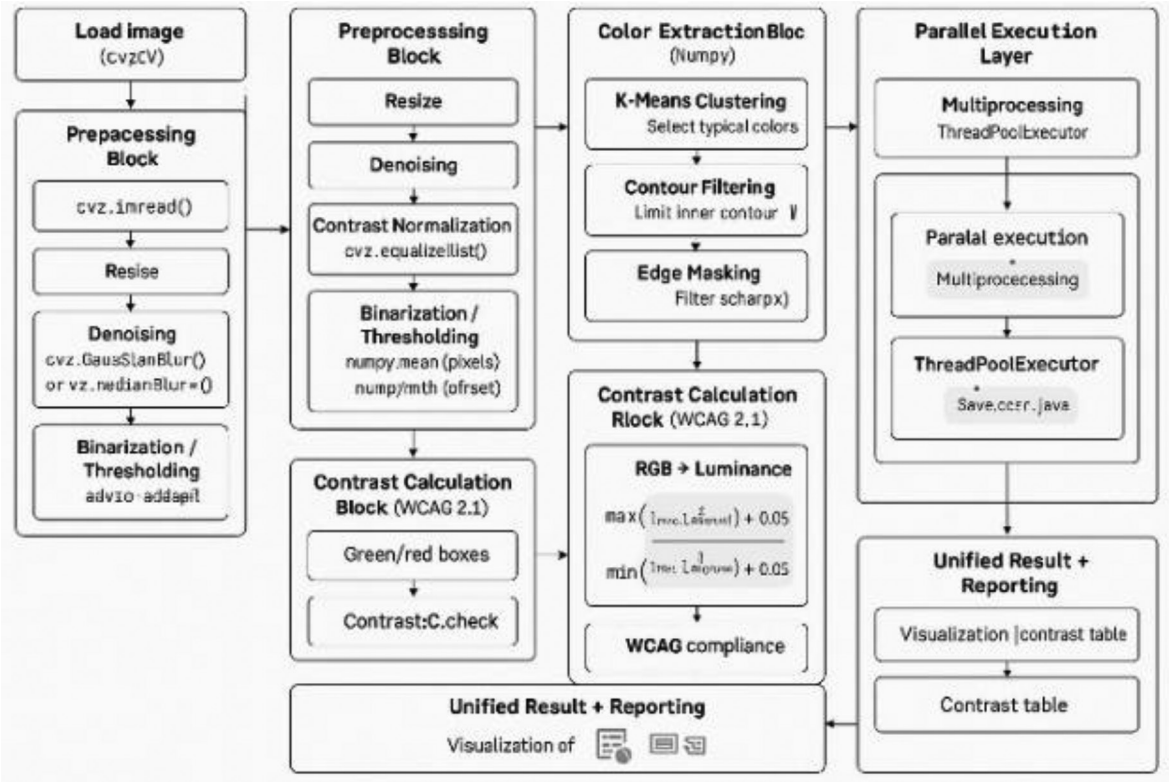


Рис. 1. Блок-схема паралельної реалізації аналізу контрастності веб-контенту

Також, паралельне виконання операцій було застосовано для визначення кольорів тексту та фону. Тобто, для кожного блоку тексту, паралельно обчислюємо колір тексту та фону, на основі виділених частин зображення на етапі розпізнавання тексту. Тоді проводимо розрахунок контрастності для кожного текстового блоку паралельно. Після завершення усіх етапів паралельної обробки, результати (в тому числі обчислені значення контрастності для кожного блоку тексту) об'єднуються, та в такий спосіб формуємо в кінцевий результат – звіт про контрастність зображення. Цей етап є фінальним і може бути виконаний після того, як всі потоки завершені.

Впровадження принципів паралельних обчислень дозволяє суттєво підвищити швидкодію програмного забезпечення та водночас забезпечити ефективну обробку «великих» зображень.

3. Тестування та аналіз розробленого програмного забезпечення

Розглянемо детальніше приклад застосування розробленого програмного продукту для реальних веб-сторінок. Зокрема, для тестування було обрано веб-ресурс Medium (режим доступу: https://medium.com/), де подано список блогів та розміщено типові елементами графічного інтерфейсу користувача (заголовки, кнопки, посилання тощо). Вхідне зображення однієї з веб-сторінок веб-ресурсу Medium подано на рис. 2.

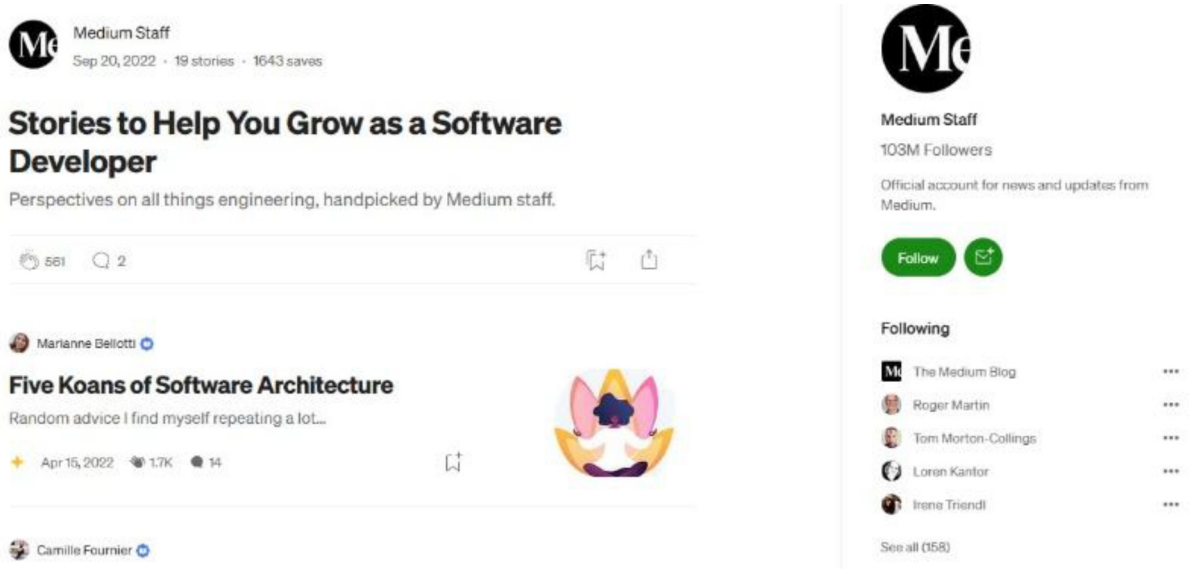


Рис. 2. Вхідне зображення веб-сторінки

На рис. 3 проілюстровано результати аналізу контрастності, отримані із використанням розробленого програмного забезпечення, що демонструють різні елементи веб-сторінки, що не відповідають встановленим стандартам контрастності WCAG 2.1. Отримані результати вказують на значні проблеми з рівнями контрастності у даного веб-ресурсу, наприклад, деякі посилання та кнопки на сторінці мають дуже низький контраст на фоні, що ускладнює їх візуальне сприйняття, а особливо для людей з вадами зору.

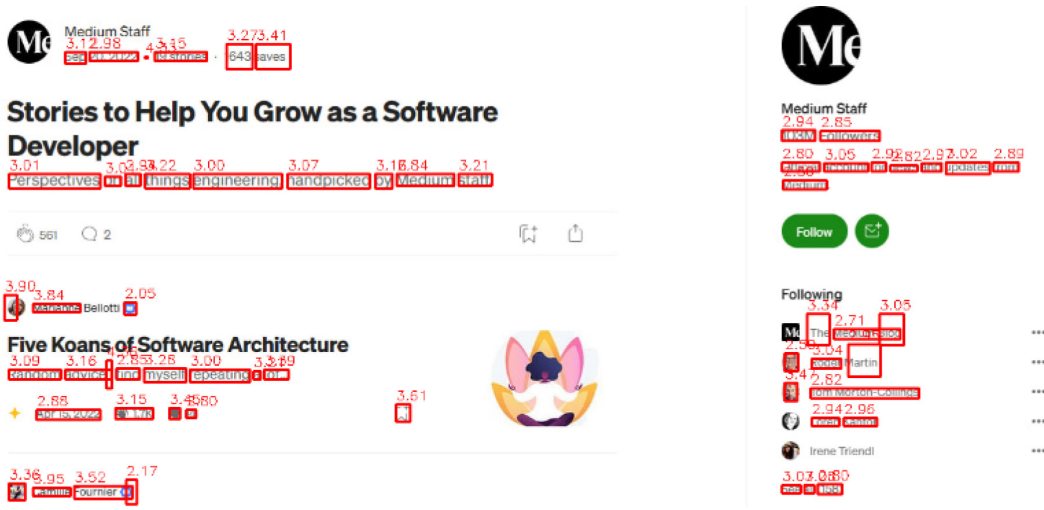


Рис. 3. Вихідне зображення веб-сторінки (звіт про контрастність зображення)

Для об'єктивної оцінки ефективності роботи програмного продукту, а також їхнього порівняння з існуючими аналогами, було розроблено спеціальну методику тестування. Вона містить чітко визначені критерії оцінки, стандартизовані тестові дані та однакові умови проведення випробувань, зокрема такі критерії: час обробки зображення; точність розпізнавання тексту та обчислення; стабільність роботи.

Під час тестування було використано вибірку зображень, що охоплює різні сценарії використання: зображення невеликого розміру (до 1 МБ) із чітким текстом; зображення середнього розміру (1–5 МБ) із помірною кількістю текстових елементів; великі зображення (понад 5 МБ) із численними блоками тексту різного розміру та контрастності; зображення з низьким рівнем контрастності між текстом і фоном.

Для тестування було використано таке апаратне забезпечення: процесор: Intel Core i7; оперативна пам'ять: 16 ГБ RAM; накопичувач: SSD-диск; програмне середовище: Windows 11 x64; версії бібліотек OpenCV, Pytesseract, NumPy – однакові для всіх тестів.

Кожен тест виконувався не менше трьох разів для мінімізації впливу випадкових затримок системи, після чого обчислювалося середнє значення показників. Для порівняння були обрано відкриті бібліотеки та сервіси, що виконують автоматичне розпізнавання тексту на зображеннях і оцінку контрастності між текстом і фоном. Зокрема: Google Vision API – комерційний сервіс із підтримкою OCR і аналізу зображень; Adobe Acrobat OCR + Accessibility Checker – функціональність для сканування документів і перевірки доступності, включно з оцінкою контрастності; Tesseract + Custom Scripts – комбінація відкритого OCR-движка Tesseract із самостійними скриптами для оцінки контрастності. Ці рішення були обрані через їхню доступність і популярність у сфері аналізу зображень і забезпечення доступності.

Спершу розглянемо результати тестування за критерієм «Час обробки зображень».

Таблиця 1

Порівняння за критерієм «Час обробки зображень»

Рішення	Маленьке зображення (с)	Середнє зображення (с)	Велике зображення (с)
Власна розробка	1.2	3.1	7.6
Google Vision API	0.9	2.8	5.5
Adobe Acrobat OCR + Accessibility Checker	1.5	4.0	8.2
Tesseract + Custom Scripts	1.8	5.2	11.0

Аналіз результатів тестування показав, що Google Vision API працює найшвидше, що пов'язано із використанням зовнішніх ресурсів, зокрема засобів хмарних обчислень. Власна розробка поступається Google Vision API, але випереджає інші відкриті рішення.

Далі розглянемо результати тестування за критерієм «Точність визначення текстових блоків і контрастності».

Таблиця 2

Порівняння за критерієм «Точність визначення текстових блоків і контрастності»

Рішення	Маленьке зображення (%)	Середнє зображення (%)	Велике зображення (%)
Власна розробка	93.7	91.5	87.6
Google Vision API	95.2	94.1	90.5
Adobe Acrobat OCR + Accessibility Checker	92.0	89.8	85.0
Tesseract + Custom Scripts	90.5	87.3	82.4

Власна розробка демонструє результати, близькі до комерційного продукту Google, що підтверджує вдалу програмну реалізацію продукту та ефективне впровадження принципів паралельних обчислень. Водночас, Adobe Acrobat і Tesseract мають нижчу точність, особливо при аналізі великих або складних зображень.

І останнім розглянемо результати тестування за критерієм «Стабільність роботи».

Таблиця 3

Порівняння за критерієм «Стабільність роботи»

Рішення	Кількість збоїв на 100 обробок
Власна розробка	0–1
Google Vision API	0
Adobe Acrobat OCR + Accessibility Checker	2
Tesseract + Custom Scripts	5

Google Vision API повністю стабільний завдяки обробці на стороні сервера, водночас, власна розробка продемонструвала дуже високу стабільність, близьку до Google Vision API. При цьому, Tesseract + Custom Scripts має суттєві проблеми при обробці великих і складних файлів.

Висновки

У цій роботі реалізовано та протестовано запропонований підхід до автоматизованого аналізу контрастності тексту на зображеннях, відповідно до вимог стандарту WCAG 2.1 на основі проведеної його програмної реалізації.

Основними етапами роботи були: розробка підходу для визначення контрасту між текстом і фоном, використання популярних інструментів, таких як Python, OpenCV та Tesseract OCR, а також тестування розробленого модуля на реальних веб-сторінках, зокрема на веб-сайті Medium.

У порівнянні з відомими аналогами, зокрема Google Vision API, Adobe Acrobat OCR та Tesseract + Custom Scripts, розроблений підхід показав конкурентоспроможні результати, поступаючись комерційним хмарним сервісам в незначній мірі, проте значно перевершуючи локальні альтернативи як за стабільністю, так і за адаптивністю до складного фону.

Таким чином, запропонована паралельна архітектура та алгоритмічна реалізація забезпечують ефективний, точний і автономний інструмент для автоматизованого аналізу контрастності, який може бути корисним як для аудиту цифрової доступності, так і для інтеграції в більші системи контролю якості контенту.

Список використаної літератури

1. A. Gubbi Mohanbabu and A. Pavel. Context-Aware Image Descriptions for Web Accessibility. *arXiv preprint arXiv:2409.03054*, 2024. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2409.03054

2. J. L. Chodrow,.Automated assessment of web accessibility using computer vision. 2020. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2007.01830

3. I. Madiudia, N. Porplytsya and M. Nagara. Mathematical Model for Prediction the Dynamics of Organic Traffic at E-commerce Web-site in the Process of its Search Engine optimization. *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Deggendorf, Germany, 2020, pp. 577-580, doi: 10.1109/ACIT49673.2020.9208886

4. K. Zelenetska, N. Porplytsya, I. Stasiv, S. Stańczyk, A. Jankowiak and L. Bilovus. SEO-Optimization of Product Content on a Marketplace Platform. *2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Wrocław, Poland, 2023, pp. 201–205, doi: 10.1109/ACIT58437.2023.10275590

5. Lighthouse: Audits for performance, accessibility, and SEO. 2021. [Online]. Available: https://developers.google.com/web/tools/lighthouse.

6. M. Dyvak, I. Darmorost, N. Porplytsya and I. Hural. Structure Identification of Difference Equations with Interval Estimates of their Parameters. *2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Polyana, Ukraine, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/CADSM.2019.8779308

7. M. Dyvak, A. Pukas, N. Porplytsya, I. Oliinyk and P. Basistyi. Method of Structural Identification the Interval Models of Static Objects. *2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Deggendorf, Germany, 2021, pp. 105-110, doi: 10.1109/ACIT52158.2021.9548379

8. M. Zhang et al. Are your apps accessible? A GCN-based accessibility checker for low vision users. *arXiv preprint arXiv:2502.14288*, 2025. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2502.14288

9. OpenCV Documentation. Image Thresholding. [Online]. Available: https://docs.opencv.org/4.x/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html.

10. OpenCV Documentation. Contours: Getting Started. [Online]. Available: https://docs.opencv.org/3.4/d4/d73/tutorial_py_contours_begin.html

11. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1. 2018. [Online]. Available: https://www.w3.org/TR/WCAG21/

12. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.0. 2008. [Online]. Available: https://www.w3.org/TR/WCAG20/

References

1. A. Gubbi Mohanbabu and A. Pavel. Context-Aware Image Descriptions for Web Accessibility. *arXiv preprint arXiv:2409.03054*, 2024. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2409.03054

2. J. L. Chodrow,.Automated assessment of web accessibility using computer vision. 2020. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2007.01830

3. I. Madiudia, N. Porplytsya and M. Nagara. Mathematical Model for Prediction the Dynamics of Organic Traffic at E-commerce Web-site in the Process of its Search Engine optimization. *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Deggendorf, Germany, 2020, pp. 577-580, doi: 10.1109/ACIT49673.2020.9208886

4. K. Zelenetska, N. Porplytsya, I. Stasiv, S. Stańczyk, A. Jankowiak and L. Bilovus. SEO-Optimization of Product Content on a Marketplace Platform. *2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Wrocław, Poland, 2023, pp. 201-205, doi: 10.1109/ACIT58437.2023.10275590

5. Lighthouse: Audits for performance, accessibility, and SEO. 2021. [Online]. Available: https://developers.google.com/web/tools/lighthouse

6. M. Dyvak, I. Darmorost, N. Porplytsya and I. Hural. Structure Identification of Difference Equations with Interval Estimates of their Parameters. *2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Polyana, Ukraine, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/CADSM.2019.8779308

7. M. Dyvak, A. Pukas, N. Porplytsya, I. Oliinyk and P. Basistyi. Method of Structural Identification the Interval Models of Static Objects. *2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Deggendorf, Germany, 2021, pp. 105-110, doi: 10.1109/ACIT52158.2021.9548379

8. M. Zhang et al. Are your apps accessible? A GCN-based accessibility checker for low vision users. *arXiv preprint arXiv:2502.14288*, 2025. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2502.14288

9. OpenCV Documentation. Image Thresholding. [Online]. Available: https://docs.opencv.org/4.x/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html

10. OpenCV Documentation. Contours: Getting Started. [Online]. Available: https://docs.opencv.org/3.4/d4/d73/tutorial_py_contours_begin.html

11. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1. 2018. [Online]. Available: https://www.w3.org/TR/WCAG21/

12. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.0. 2008. [Online]. Available: https://www.w3.org/TR/WCAG20/

УДК 004.4′2 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.36

В. С. РАЛЕНКО
викладач кафедри інженерії програмного забезпечення
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
ORCID: 0009-0009-4161-8468

К. О. АНТІПОВА
доктор філософії,
доцент (б.в.з.) кафедри інженерії програмного забезпечення
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
ORCID: 0000-0002-9012-5290
Scopus-Author ID: 57212609599

АНАЛІЗ ПЕРЕВАГ ТА НЕДОЛІКІВ ГЕНЕРАЦІЇ КОДУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ В СУЧАСНИХ IDE

У роботі розглянуто способи використання великих мовних моделей для генерації програмного коду. Основна увага приділяється IDE та вбудованим в них системам штучного інтелекту для використання в таких завданнях, як створення проєктів, побудова архітектури програмних застосунків та прототипування застосунків за запитами до моделей. Коду, згенерованому штучним інтелектом, бракує відстежуваності, він часто потребує ітеративного доопрацювання – виклики, з якими існуючі IDE не здатні впоратися. На відміну від коду, створеного людиною, згенерований код погано інтегрується зі структурованими робочими процесами розробки. Як наслідок, розробники борються з галюцинаціями ШІ, коли моделі генерують правдоподібний, але некоректний код, який важко перевірити. У рамках цього дослідження виявлено ситуації некоректної роботи великих мовних моделей як неправильна інтерпретація намірів користувача, галюцинація моделі, неправильне використання API, пов'язане з відсутніми елементами, та використання надлишкової інформації. Зловживання сторонніми API у згенерованому коді є серйозною проблемою у розробці програмного забезпечення. Хоча моделі продемонстрували вражаючі можливості генерації коду, їхня взаємодія зі складними бібліотечними API залишається дуже схильною до появи помилок, що потенційно може призвести до збоїв у роботі програмного забезпечення та вразливостей у безпеці. Результати дослідження демонструють, що найкраще використовувати автозаповнення коду, так як воно надає можливість згенерувати код за запитом із дотриманням заданих обмежень та з меншою ймовірністю появи помилок. Але, серед недоліків такого підходу можна виявити відсутність можливості генерувати код відразу в декількох файлах. Отримані результати сприятимуть оптимальному вибору варіантів використання штучного інтелекту та великих мовних моделей в розробці застосунків. Ця робота спрямована на покращення розуміння сценаріїв використання великих мовних моделей в роботі з програмним кодом.

Ключові слова: *генерація коду, великі мовні моделі, інтегроване середовище розробки, ШІ-помічник.*

V. S. RALENKO
Lecturer at the Department of Software Engineering
Petro Mohyla Black Sea National University
ORCID: 0009-0009-4161-8468

K. O. ANTIPOVA
Ph.D., Associate Professor at the Department of Software Engineering
Petro Mohyla Black Sea National University
ORCID: 0000-0002-9012-5290
Scopus-Author ID: 57212609599

ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF GENERATING CODE USING LARGE LANGUAGE MODELS IN MODERN IDE

In this paper we discuss ways to use large language models to generate program code. The focus is on IDEs and their built-in artificial intelligence for such tasks as creating projects, building software application architectures, and prototyping applications based on prompts. AI-generated code lacks traceability and often requires iterative refinement, challenges that existing IDEs are unable to address. Unlike human-created code, generated code does not integrate well with structured development workflows. As a result, developers struggle with AI hallucinations, when models generate plausible but incorrect code that is difficult to verify. This research has identified situations of incorrect output of LLMs as intent misuse, hallucination, missing items misuse, and redundancy misuse. Misuse of third-party APIs in generated code

is a serious problem in software development. Although LLMs have demonstrated impressive code generation capabilities, their interaction with complex library APIs remains highly error-prone, potentially leading to software malfunctions and security vulnerabilities. The obtained results show that code autocomplete is more useful, as it makes it possible to generate code on demand in compliance with the specified restrictions and with a lower probability of errors. However, among the disadvantages of this approach is the lack of the ability to generate code in several files at once. The results obtained will contribute to the optimal choice of options for using AI and LLMs in application development. This work is aimed at improving the understanding of scenarios for using LLMs in working with program code.

Key words: *AI-assistant, code generation, IDE, LLM.*

Постановка проблеми

Багато великих мовних моделей (ВММ) мають можливість генерувати код, якщо дані, на яких вони навчаються, містять приклади коду. Інструменти ВММ добре підходять для розв'язання вступних завдань з програмування і добре показують себе у вступних курсах з інформатики. Зокрема, за наявності підказки, яка описує програму природною мовою, інструменти штучного інтелекту (ШІ) можуть генерувати функціональний код після однієї або декількох спроб.

Сучасні інтегровані середовища розробки (integrated development environment, IDE) були створені для коду, написаного людиною, де розробники контролюють процеси маніпулювання кодом, правки структуруються вручну, а зміни є наслідками передбачуваних робочих процесів. Однак код, згенерований ШІ, створюється динамічно, йому бракує відстежуваності, і він часто потребує ітеративного доопрацювання – виклики, з якими існуючі IDE не здатні впоратися. Поточні реалізації, такі як Copilot від GitHub, ChatGPT від OpenAI, Gemini від Google тощо, позиціонують ШІ як асистента або агента, який працює пліч-о-пліч з розробником. На відміну від коду, створеного людиною, код, згенерований ШІ, може бути досить непередбачуваним, йому не притаманне відстеження походження і він погано інтегрується зі структурованими робочими процесами розробки. Як наслідок, розробники борються з галюцинаціями ШІ, коли моделі генерують правдоподібний, але некоректний код, який важко перевірити.

Такі галюцинації часто пов'язані з послідовними та логічними міркуваннями або процесами глибокого пошуку, які керуються ШІ, але залишаються непрозорими для розробника. Низький рівень прозорості та відстежуваності може привести до втрати контролю розробниками, що ускладнює довіру до коду, згенерованого ШІ. Відсутність прозорості змушує розробників покладатися на пропозиції ШІ без повного розуміння їхньої логіки та аргументації рішень і того, чи відповідає код намірам розробника, що підвищує ризик інтеграції помилкового або неоптимального коду. Без ретельного контролю розробникам може бути складно спрямовувати згенерований ШІ код на створення якісних рішень, які можна в подальшому підтримувати.

Залишається незрозумілим, чи роблять ВММ ті ж типи помилок у використанні прикладних програмних інтерфейсів (application programming interface, API), що й звичайні розробники. Більше того, дослідження шаблонів неправильного використання API у моделях з відкритим та закритим кодом є дуже важливим, оскільки моделі з відкритим кодом часто відстають від своїх закритих аналогів за продуктивністю. Сучасні підходи до запобігання зловживанню API в основному зосереджені на автоматичному виявленні за допомогою попередньо визначених типів зловживань та документації до API. Однак ці методи стикаються зі значними обмеженнями при застосуванні до генерації коду на основі ВММ, що включає мільйони API та різноманітні контексти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У широкому контексті ефективність GitHub Copilot була оцінена у вирішенні численних тестів з комп'ютерних наук, включаючи питання з множинним вибором та вправи з програмування на Python [1]. Їхні висновки показують, що хоча модель не змогла пройти курс, вона досягла високих результатів у більшості вправ і змогла покращити відповіді на основі зворотного зв'язку від автооцінювача. В іншому підході ефективність Github Copilot була оцінена при розв'язуванні задач Парсонса, а саме програм, де програмний код подано в неправильному порядку [2]. Показано, що Copilot може вирішити 80 % проблем на Python, якщо ігнорувати помилки відступів.

Автори [3] досліджували здатність GitHub Copilot вирішувати завдання на великому наборі простих вправ з програмування на Python. Коли ВММ не могла згенерувати правильний розв'язок, автори намагалися надати більш чіткі інструкції природною мовою (*prompt engineering*). Загалом Copilot не міг надати правильне рішення для 20 % завдань. Автори [4] оцінили здатність GitHub Copilot вирішувати вступні завдання з програмування. Їх робота включає оцінку декількох згенерованих програм для набору тестів з програмування у відповідному курсі. Їхні висновки показують, що GitHub Copilot отримав високі бали на тестах з програмування, перевершивши більшість здобувачів вищої освіти.

Існуючі дослідження зловживань використання API у коді, згенерованому ВММ, зосереджувалися переважно на контрольованих, синтетичних сценаріях. Наприклад, у роботі [5] автори досліджували якість коду, згенерованого кількома моделями на основі питань у стилі StackOverflow, і виявили, що GPT-4 генерував код із зловживанням API у 62 % випадків при тестуванні на 18 широко використовуваних Java API. Аналогічно, автори [6]

досліджували зловживання API шляхом вивчення питань програмування на Java, пов'язаних з безпекою, і виявили, що ВММ зловживали API приблизно в половині завдань. Нещодавній аналіз помилок 1000 зразків з існуючих бенчмарків виявив три основні типи помилок: AttributeError, TypeError і ValueError, які зазвичай асоціюються з неправомірним використанням API у коді, що генерується ВММ. Хоча ці дослідження продемонстрували, що певні моделі можуть генерувати код із неправильним використанням API на обмеженій кількості бібліотек, API та мов програмування, їхні висновки не можуть бути узагальнені для реальних контекстів програмування через їхню залежність від питань та сценаріїв, створених людиною.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є спостереження, як інструменти ВММ справляються із генерацією коду на основі запиту з певними обмеженнями. Зокрема, ми зосередилися на завданнях з програмування для здобувачів третього курсу університету, щоб дослідити, як інструменти ВММ справляються з ними. Питання полягає в тому, чи можуть інструменти ВММ розшифрувати описане природною мовою завдання на програмування, розпізнати задачу, яку потрібно розв'язати, та встановлені умови її щодо розв'язання, і згенерувати функціональний код, який вирішує цю задачу.

Викладення основного матеріалу дослідження

Традиційні інтегровані середовища розробки, такі як Eclipse та Visual Studio Code, докорінно змінили підхід розробників до кодування. Вони надають розробникам потужні інструменти, які полегшують практику модульного кодування, від написання коду на різних рівнях до рефакторингу, збірки та тестування.

Розробники використовують IDE для роботи зі складними проєктами завдяки таким функціям, як редагування коду з підсвічуванням синтаксису та автозавершенням. Модульний підхід до кодування ще більше посилюється дизайном інтерфейсу IDE, який організовує код у логічні секції, полегшуючи розробникам керування та маніпулювання різними частинами їхніх проєктів. Така структура не лише сприяє ефективному кодуванню, але й допомагає у налагодженні та доопрацюванні кодової бази за потреби.

Інтеграція в традиційні IDE асистентів на основі ШІ призвела до значних змін в практиці розробки програмного забезпечення. Однією з найпомітніших функцій є вбудовані підказки, які надають допомогу розробникам у режимі реального часу під час написання коду або його ітерацій. Ця функція не лише завершує рядки коду, але й пропонує контекстно-релевантні пропозиції, засновані на вимогах проєкту та найкращих практиках. Інтерфейс чату дозволяє розробникам вести діалог зі штучним інтелектом для створення або рефакторингу вихідного коду. Цей підхід особливо корисний для створення коментарів до документації або юніт-тестів, створюючи контекстно-релевантні результати, які покращують зрозумілість проєкту.

Як і інші методи ШІ, інструменти генерації коду страждають від невизначеності та недосконалості, притаманних їм за своєю природою. Вони можуть генерувати код з помилками або навіть код, який кардинально відрізняється від очікувань користувачів. Однак, на відміну від інших областей, генерація коду вимагає набагато вищого рівня коректності: код або компілюється, або ні, і він або правильний, або містить помилки, такі як логічні помилки та вразливості безпеки [7].

ВММ зазвичай роблять типові помилки, коли пропонують завершити або вставити код [8]:

– модель генерує неповні виклики методів та/або з помилковими параметрами;
– модель генерує виклики методів до схожих, але не пов'язаних між собою API;
– модель генерує сторонні виклики методів, які не потрібні в контексті цільового використання;
– модель не дотримується необхідної послідовності викликів методів для правильного налаштування та використання цільової бібліотеки через складність її API;
– модель має викликати виклики API до декількох бібліотек, але не може правильно використовувати ці різні бібліотечні API разом.

Всі ці помилки може бути дуже складно виявити і виправити, як статично, так і динамічно.

Поширеною схемою взаємодії є використання ШІ як замінника пошуку в Інтернеті. Однак, на відміну від прикладів коду з вебресурсу Stack Overflow, які перевіряються програмістами-людьми, код, згенерований ШІ, може містити помилки. Оскільки ШІ генерує лише одне рішення за раз, програмісти не можуть порівняти кілька альтернативних рішень і оцінити їхню якість, як це часто роблять під час пошуку в Інтернеті.

Хоча генерування коду за допомогою ШІ відбувається швидше, ніж копіювання коду з Інтернету, згенерований код може містити помилки, що призводить до збільшення часу, витраченого на налагодження. Тоді як код з Інтернету, як правило, не містить помилок, супроводжується поясненнями та обговореннями і може бути змінений відповідно до поточного завдання шляхом внесення незначних правок. ШІ також надає користувачам корисну відправну точку для початку роботи, навіть якщо згенерований код був неправильним. Це особливо корисно для користувачів, які застрягли в проблемі або не знають, як підійти до виконання завдання.

Зловживання сторонніми API у коді, згенерованому ВММ, є серйозною проблемою у розробці програмного забезпечення. Хоча ВММ продемонстрували вражаючі можливості генерації коду, їхня взаємодія зі складними бібліотечними API залишається дуже схильною до появи помилок, що потенційно може призвести до збоїв у роботі програмного забезпечення та вразливостей у безпеці.

Неправильна інтерпретація намірів виникає, коли модель обирає API або метод, який є синтаксично правильним, але не відповідає запланованій функціональності або завданню. Це призводить до неправильної поведінки через нерозуміння моделлю призначення методу.

Галюцинація моделі виникає, коли модель вводить абсолютно неправильний метод API або параметр, який не існує або не потрібен для виконання завдання. Модель може створити або «галюцинувати» виклик API, який здається правдоподібним, але є недійсним у контексті, що призводить до помилкової поведінки або помилки компіляції/виконання.

Неправильне використання, пов'язане з відсутнім елементом відбувається, коли модель пропускає необхідний метод або параметр API, що призводить до неповної або некоректної поведінки. Цей тип зловживань зазвичай виникає, коли модель не повністю розуміє вимоги API або ігнорує важливі деталі, які необхідні для правильного використання.

Використання надлишкової інформації виникає, коли модель включає непотрібні ланцюжки методів або повторювані виклики API, які не сприяють виконанню завдання і призводять до неефективності або потенційних помилок.

В якості прикладу згенерованого коду розглянемо новий інструмент прототипування на базі Firebase Studio. Firebase Studio – новий продукт, представлений компанією Google 9 квітня 2025 року для використання Google Platform в якості середовища розробки різних видів застосунків, таких як веб-застосунки (front-end та fullstack) і мобільні застосунки (кросплатформні та нативні).

Для тесту введемо наступний запит: «Згенеруй Android-застосунок, який буде мати інтерфейс з використанням AntD та працювати з запитами згідно документації до API: People Data Generator API». Також в запит були додані деталі API які мають працювати локально на іншому проєкті. Відповідно, очікуваний результат – прототип Android-застосунку, який буде містити в собі поля згідно опису параметрів API та матиме стилізацію згідно AntDesign. AntDesign – це бібліотека для React застосунків, тому стиль має бути запозичений з цієї бібліотеки. Результат запиту наведений нижче.

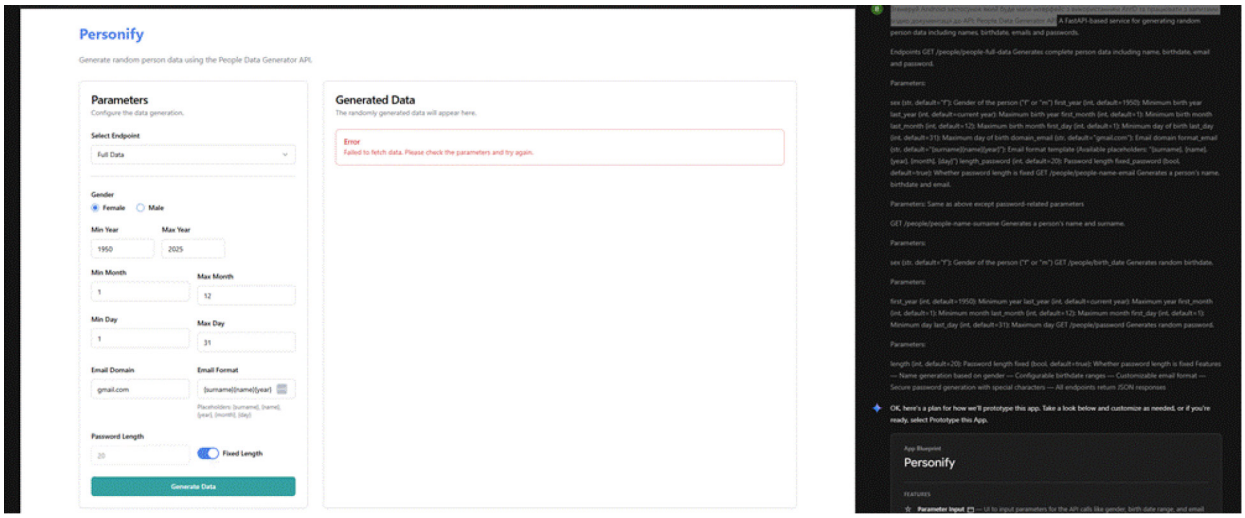


Рис. 1. Результат першого запиту

На рис. 1 наведений приклад галюцинації моделі. В коді можна побачити, що створений вебзастосунок на основі бібліотеки React, але при цьому AntDesign компоненти не застосовуються. В запиті використання інтерфейсу AntD було пріоритетним, але оскільки модель володіє інформацією лише про React, тому був створений саме вебзастосунок. Проблема, яка виникла, була вирішена лише за допомогою ручного вибору для створення проєкту Android та використання автозавершення коду.

На рис. 2 показаний результат генерації коду за допомогою автозавершення, який дозволяє автоматично заповнювати необхідні частини коду всередині файлу, та, за необхідністю, за допомогою запиту для інших файлів можна зробити робочий проєкт. Недоліком такого підходу є відсутність одночасної генерації коду в різних файлах.

На практиці розробники часто не приймають початкові пропозиції асистентів ШІ-програмування. Розробникам важко зрозуміти, які вхідні дані впливають на генерацію коду, вони відмовляються від використання отриманого коду і не можуть контролювати модель, щоб вона генерувала корисні пропозиції щодо коду. Найчастішими причинами, чому користувачі відмовляються від використання отриманого коду, є те, що код не виконує правильної дії або не відповідає функціональним чи нефункціональним вимогам.

```
class MainActivity : ComponentActivity() {
    }
}

@Composable
fun PersonDataScreen(modifier: Modifier = Modifier) {
    var personData by remember { mutableStateOf<String?>(null) }
    var isLoading by remember { mutableStateOf(true) }
    var hasError by remember { mutableStateOf(false) }

    LaunchedEffect(Unit) {
        try {
            val client = OkHttpClient()
            val request = Request.Builder()
                .url("https://api.example.com/people/people-full-data")
                .get()
                .build()

            val response: Response = client.newCall(request).execute()
            if (response.isSuccessful) {
                val jsonData = response.body?.string()
                val jsonObject = JSONObject( json: jsonData ?: "")
                personData = jsonObject.toString( indentSpaces: 4) // Format JSON
                isLoading = false
            } else {
                hasError = true
                isLoading = false
            }
        } catch (e: Exception) {
            hasError = true
            isLoading = false
        }
    }

    if (isLoading) {
        Text(text = "Loading...", modifier = modifier)
    } else if (hasError) {
        Text(text = "Error fetching data", modifier = modifier)
    } else {
        personData?.let { Text(text = it, modifier = modifier) }
    }
}

@Composable
fun Greeting(name: String, modifier: Modifier = Modifier) {
    Text(
        text = "Hello $name!",
        modifier = modifier
    )
```

Рис. 2. Результат другого запиту

Висновки

У цій статті наведено результати досліджень можливостей ВММ для розв'язання задач програмування. Наші результати показують, що такі інструменти мають труднощі з генерацією правильного вихідного коду. ВММ часто здатні розпізнати алгоритм, необхідний для розв'язання завдання, однак моделі мають труднощі з адаптацією коду до конкретних обмежень і часто схильні застосовувати популярні рішення замість того, щоб слідувати заданим інструкціям. Хоча сучасні помічники для програмування зі штучним інтелектом є високопродуктивними, існує розрив між потребами розробників і можливостями інструментів, наприклад, щодо врахування нефункціональних вимог при створенні коду.

Список використаної літератури

1. Šavelka, J., Agarwal, A., Bogart, C., Song, Y., & Sakr, M. F. (2023). Can Generative Pre-trained Transformers (GPT) Pass Assessments in Higher Education Programming Courses? *Proceedings of the 2023 Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education V. 1*. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.09325

2. Reeves, B., Sarsa, S., Prather, J., Denny, P., Becker, B.A., Hellas, A., Kimmel, B., Powell, G., & Leinonen, J. (2023). Evaluating the performance of code generation models for solving parsons problems with small prompt variations.

Proceedings of the 2023 Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education V. 1. DOI: https://doi.org/10.1145/3587102.3588805

3. Denny, P., Kumar, V., & Giacaman, N. (2023). Conversing with Copilot: Exploring prompt engineering for solving CS1 problems using natural language. *Proceedings of the 54th ACM Technical Symposium on Computer Science Education V. 1*. DOI: https://doi.org/10.1145/3545945.3569823

4. Finnie-Ansley, J., Denny, P., Becker, B.A., Luxton-Reilly, A., & Prather, J. (2022). The robots are coming: Exploring the implications of openai codex on introductory programming. *Proceedings of the 24th Australasian Computing Education Conference*. DOI: https://doi.org/10.1145/3511861.3511863

5. Zhong, L., Wang, Z. (2024). Can LLM replace stack overflow? A study on robustness and reliability of large language model code generation. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, vol. 38, no. 19*. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.10335

6. Mousavi, Z., Islam, C., Moore, K., Abuadbba, A. & Babar, M. A. (2024). An investigation into misuse of java security apis by large language models. *Proceedings of the 19th ACM Asia Conference on Computer and Communications Security*. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.03823

7. Vaithilingam, P., Zhang, T., & Glassman, E. L. (2022). Expectation vs. experience: Evaluating the usability of code generation tools powered by large language models. *Chi conference on human factors in computing systems extended abstracts*. https://doi.org/10.1145/3491101.3519665

8. Zhuo, T.Y., He, J., Sun, J., Xing, Z., Lo, D., Grundy, J., & Du, X. (2025). Identifying and Mitigating API Misuse in Large Language Models. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.22821

UDC 004.89:004.42 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.37

M. O. REIDA
Postgraduate Student at the Department of Computer Science
Zaporizhzhia National University
ORCID: 0009-0002-3098-113X

G. A. DOBROVOLSKY
Candidate of Technical Sciences,
Professor at the Department of Computer Science
Zaporizhzhia National University
ORCID: 0000-0001-5742-104X

SURVEY ON AI IN THE FUNCTIONAL SOFTWARE TESTING

The survey conducts a systematic review of the application of artificial intelligence (AI) in software quality control and testing, covering both functional and non-functional quality aspects across all testing stages. The study analyzes various AI techniques, including machine learning, deep learning, evolutionary algorithms, and natural language processing, while also examining AI-based testing tools. It highlights advancements, challenges, and research gaps, drawing on scientific publications from the last decade, supplemented by key foundational works.

Functional software quality is defined by its compliance with requirements and correct execution of functions, verified through unit, integration, system, and acceptance testing. AI facilitates automation of test case generation, defect prediction, and oracle design. Non-functional quality encompasses attributes such as performance, reliability, security, and usability, which are more challenging to automate. The review emphasizes AI's role in automating testing, particularly regression testing, to ensure product stability after changes.

Key AI applications include test case generation and test automation using search-based algorithms (e.g., EvoSuite, Sapienz), deep learning, and large language models (LLMs) like Codex. AI is also utilized for defect prediction, code quality assessment, test selection, prioritization, and optimization of test execution in continuous integration environments. Tools like Diffblue Cover demonstrate industrial adoption of AI for generating compact test suites.

Major challenges include the oracle problem (determining correct test outcomes), data dependency, the need for model transparency, and limited applicability in safety-critical domains. Future research directions include automating oracles, integrating AI with DevOps, developing human-in-the-loop hybrid systems, and establishing standards for AI in testing. The review calls for unified datasets and benchmarks to evaluate AI testing techniques, particularly in safety-critical sectors like healthcare and automotive.

Key words: *Survey, Artificial intelligence, Machine learning, Test Case Generation, Test Automation, Defect Prediction, Test Selection, Test Prioritization, Test Execution Optimization.*

М. О. РЕЙДА
аспірант кафедри комп'ютерних наук
Запорізький національний університет
ORCID: 0009-0002-3098-113X

Г. А. ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерних наук
Запорізький національний університет
ORCID: 0000-0001-5742-104X

ОГЛЯД ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У ФУНКЦІОНАЛЬНОМУ ТЕСТУВАННІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Ця стаття представляє систематичний огляд застосування штучного інтелекту (ШІ) у контролі якості та тестуванні програмного забезпечення, охоплюючи як функціональні, так і нефункціональні аспекти якості на всіх етапах тестування. Дослідження аналізує різноманітні техніки ШІ, включаючи машинне навчання, глибоке навчання, еволюційні алгоритми та обробку природної мови, а також розглядає інструменти тестування на основі ШІ. У роботі висвітлено досягнення, виклики та прогалини в дослідженнях, використовуючи наукові публікації за останні 10 років, доповнені ключовими фундаментальними роботами.

Функціональна якість програмного забезпечення визначається його відповідністю вимогам і правильним виконанням функцій, що перевіряється через модульне, інтеграційне, системне та приймальне тестування. ШІ сприяє автоматизації створення тестових випадків, прогнозуванню потенційних помилок і розробці оракулів.

Нефункціональна якість охоплює такі аспекти, як продуктивність, надійність, безпека та зручність використання, які складніше автоматизувати. Огляд підкреслює роль ШІ в автоматизації тестування, зокрема регресійного, для забезпечення стабільності продукту після змін.

Серед ключових застосувань ШІ виділено генерацію тестових випадків і автоматизацію тестування за допомогою пошукових алгоритмів (наприклад, EvoSuite, Sapienz), глибокого навчання та великих мовних моделей (LLM), таких як Codex. ШІ також використовується для передбачення дефектів, оцінки якості коду, вибору та пріоритизації тестів, а також оптимізації виконання тестів у середовищах безперервної інтеграції. Інструменти, такі як Diffblue Cover, демонструють промислове впровадження ШІ для створення компактних тестових наборів.

Основні виклики включають проблему оракула (визначення правильних результатів тестів), залежність від даних, потребу в прозорості моделей ШІ та обмежену застосовність у критичних галузях. Перспективні напрями досліджень охоплюють автоматизацію оракулів, інтеграцію ШІ з DevOps, створення гібридних систем із залученням людини та розробку стандартів для використання ШІ у тестуванні. Огляд закликає до створення уніфікованих наборів даних і стандартів для оцінки ШІ-технік у тестуванні, особливо в безпекокритичних галузях, таких як охорона здоров'я та автомобілебудування.

Ключові слова: *Огляд, Штучний інтелект, Машинне навчання, Генерація тестових випадків, Автоматизація тестування, Прогнозування дефектів, Вибір тестів, Пріоритизація тестів, Оптимізація виконання тестів.*

Introduction

Software quality is a central concern in contemporary software engineering, defined by a system's compliance with requirements, user expectations, and standards. Quality is typically categorized into functional and non-functional aspects. Functional quality refers to the software's ability to perform its intended functions correctly. It is ensured by verifying each feature against requirements through various testing stages: unit, integration, system, and acceptance tests [1]. AI assists functional testing by generating effective test cases, predicting likely failures, and automating oracle design. Non-functional quality encompasses attributes beyond specific functions, including performance, reliability, security, usability, maintainability, portability, and compatibility [2]. For example, a web service must return correct results (functional) and meet performance benchmarks under load (non-functional). Non-functional tests often require specialized tools and environments and are more challenging to automate [3, 4]. Quality control must address both aspects. Automated testing is now standard practice, reducing risks and ensuring product stability [5]. Regression testing covers functional and non-functional aspects, verifying no regressions after changes [6].

Analysis of recent publications

Kolmogorov-Arnold Networks (KAN) is a novel class of neural networks grounded in a 1957 theorem by A. N. Kolmogorov (extended by V. Arnold) providing both flexibility and interpretability [51]. KANs have gained attention mainly in the past few years, so their applications to different tasks are being actively explored. Several surveys have been published on AI application to software testing covering mutation testing [5], artificial intelligence [7, 10] and machine learning [11, 33, 35] in software test automation. But none of them mention Kolmogorov–Arnold Networks (KANs) as a potential modeling paradigm.

The objective of this review is to re-examine how AI advances software quality control, surveys state-of-the-art AI techniques across testing stages, and identifies their impact, best practices, and challenges, providing a foundation for future research in AI-driven quality assurance. and paying the special attention to an application of KANs.

Publication selection

The publication selection combines automated snowball sampling search with manual filtering and citation network exploration. The method described below yielded 54 primary references representing the research on AI-driven software testing and quality assurance over the past decade [7].

We defined explicit inclusion and exclusion criteria for selecting publications to ensure a high-quality and relevant literature base.

Inclusion Criteria: We focused on peer-reviewed research articles (including conference papers and journal articles) and credible systematic literature reviews published roughly in the last 10 years (2015–2025). We included studies explicitly addressing the application of AI (e.g., machine learning, deep learning, evolutionary algorithms, knowledge-based systems) to software testing or quality control. Also, we included older seminal works (pre-2015) if they were highly cited and foundational to the field (to provide historical context or definitions). We limited sources to English-language publications from reputable venues in software engineering and AI. For tools or industry solutions, official documentation or whitepapers (software manuals) were considered if they provided technical details [8].

Exclusion Criteria: We excluded papers that did not specifically connect AI with software testing/quality (for example, general AI papers with no software engineering context or testing papers with no AI aspect). Non-peer-reviewed sources (blogs, opinion articles) were generally excluded unless they described essential tools (official product documentation was preferred). We also excluded publications focusing on testing AI systems rather than using AI for testing software to keep the scope on AI as a means for software quality improvement. Studies before 2015 were excluded unless identified

as high-impact classics (Artificial Intelligence in Software Testing: A Systematic Review). Non-English papers and purely theoretical works with no evaluation were also left out.

While selecting papers, we evaluated each publication against these criteria to ensure relevance and credibility. This filtering ensures the included literature comes from respected journals, conferences, or academic repositories and emphasizes contemporary developments while acknowledging key prior work [9].

At the initial stage of the publication selection process, a search using the query "AI in software testing review" in Scopus, Openalex, and Google Scholar returned a pool of the existing review studies and all the related scientific papers. Then, titles and abstracts were screened to berrypick the 20 most relevant publications. Next, we followed the controlled snowball sampling method [10] to collect the minimal complete list of publications, download full texts if freely available, and extract the basic keywords. In the last step, we removed the irrelevant references by screening the titles and abstracts.

AI Applications in Functional Software Quality Control and Testing

This section overviews how different AI methods contribute to software testing and quality control, highlights recent advances and challenges, and discusses AI-based testing tools. The discussion is organized by major testing and quality areas, such as test generation and defect prediction, encompassing functional and non-functional aspects [11].

AI for Test Case Generation and Test Automation

A leading application of AI in software testing is automatically generating test cases, scripts, or data – reducing manual effort [12, 13]. Search-based testing leverages evolutionary algorithms or meta-heuristic search to create test inputs optimizing objectives like code coverage or fault detection. Notable tools include EvoSuite, which applies genetic algorithms to evolve unit test suites for Java classes, using coverage as a fitness function over multiple generations [14]. Sapienz, another prominent tool, employs a multi-objective genetic algorithm (NSGA-II) to generate GUI action sequences for Android apps, optimizing for both crash discovery and coverage [15]. Sapienz outperformed earlier random testing tools, demonstrating that evolutionary computation is highly effective where coverage or fault detection guides the search process [16]. Beyond search-based approaches, machine learning methods have gained traction. For instance, reinforcement learning (RL) techniques treat the software under test as an environment, learning input sequences to achieve goals like reaching rare states or maximizing code coverage. Recent studies have combined deep learning with RL to generate tests from requirements [17]. In 2024, Alagarsamy et al. introduced PyTester, which employs deep RL to generate executable test cases from natural language requirements, demonstrating promise for early-stage test automation [18]. RL has also been used for test case prioritization based on feedback [19]. Large language models (LLMs) have opened new avenues for neural network-based test code generation. Modern GPT-based coding assistants can create test cases from natural language or code contexts, but these techniques are still emerging in the literature. The key challenge remains the "oracle problem": ensuring that generated tests accurately check expected outcomes. Some research has tackled this by generating assertions or leveraging specifications/contracts when available [20]. Natural Language Processing (NLP) facilitates the linkage between requirements and testing by analyzing requirement documents to generate test scenarios. Recent advances include improved constraint-solving algorithms, AI-augmented model-based testing (where state models are learned via exploratory interaction), and graph-based AI for path coverage. These techniques significantly reduce manual test writing effort and often enhance coverage and bug detection over manual methods [21]. However, several challenges persist. Generated tests must be valid and maintainable, and redundancy or brittleness can be an issue. The oracle problem remains significant: while AI readily generates inputs, determining correct outputs requires human insight or detailed specifications. Scalability to complex systems and developer trust in AI-generated tests are ongoing concerns. Research focuses on human-AI collaboration, such as AI-suggested tests reviewed by humans or AI-formulated assertions based on human-labeled outcomes. AI-based testing tools have gained industrial adoption. Diffblue Cover, for example, uses AI to autonomously generate Java unit tests by analyzing bytecode and applying AI planning for meaningful coverage [22]. Compared to EvoSuite and Randoop, Diffblue produces more concise test suites with slightly lower coverage AI has advanced test generation and automation, reducing human effort and improving maintenance. The remaining gaps include addressing the oracle problem and enhancing the semantic relevance of generated tests [23, 24, 25]. Ongoing work aims to combine large code models with domain knowledge and integrate AI-based tools into continuous integration pipelines [26, 27].

AI for Defect Prediction and Software Quality Assessment

AI plays a significant role in software quality analytics by leveraging machine learning on software data – such as source code metrics, defect histories, and test coverage – to predict where bugs are likely to occur and assess other quality outcomes. These predictions act as upstream quality controls, focusing review and testing where risk is highest [28].

Supervised machine learning is widely used to predict defect-prone code modules. Models are trained on historical data (code metrics and known defects) to classify new or modified code as likely defective. Malhotra's systematic review surveys various machine learning techniques for fault prediction, including decision trees, random forests, support vector machines, and neural networks [29]. These models often achieve good recall for defectprone files, enabling more targeted testing and refactoring [30]. Recent work applies deep and graph neural networks to learn rich code representations. For example, Wang et al. (2020) used machine learning to guide fuzz testing by predicting which inputs would yield deeper code coverage, thereby improving vulnerability discovery [31]. While fuzzing is dynamic, ML's role is analogous to

defect prediction. Despite these advances, model accuracy varies, and retraining is necessary as software or processes evolve [32].

Beyond defect prediction, AI is applied to **internal code quality evaluation**.

Machine learning classifiers can detect code smells and poorly designed code sections. AI-augmented static analysis tools learn error-prone patterns from large codebases. Unsupervised anomaly detection identifies unusual code changes, and clustering methods group code modules by quality, flagging outliers as potentially problematic [33]. AI can also estimate ”technical debt” by learning historical links between code metrics and subsequent refactoring. Bayesian networks and statistical machine learning models can predict the number of bugs remaining or expected. These models take into account factors like test execution trends, code churn, and complexity. While traditional reliability models exist, ML can exploit project-specific patterns for better forecasting.

AI also enhances test result analysis and debugging. Clustering failure reports aids bug triage, while ML classifiers can route bug reports to the right component or team. NLP on bug reports and logs identifies duplicates or suggests likely fault locations (bug localization). Some methods treat debugging as a search problem, using AI planning to propose likely fault sources or fixes – bridging toward automated program repair (e.g., GenProg, which uses evolutionary algorithms). AI-driven predictive models thus function as decision support.

A notable advancement is the direct use of deep learning on code (e.g., code tokens, ASTs, as in code2vec or codeBERT) for defect prediction, which captures richer semantic features than handcrafted metrics. The challenge, however, is the need for large labeled datasets and overcoming the cross-project prediction problem. Transfer learning and domain knowledge integration are common remedies. Additionally, while models may flag a module as risky, actionable explanations (”Why is this file risky?”) are essential for developer trust and adoption.

Ensemble methods in machine learning often surpass traditional statistical models in defect prediction, but success depends heavily on data quality and feature selection. Wider adoption in the industry is still limited by trust and integration challenges. However, as data collection in DevOps environments becomes ubiquitous, the opportunities for AI-powered predictive analytics in software quality continue to expand.

AI in Test Selection, Prioritization, and Execution Optimization

AI techniques are increasingly applied to optimize software testing after test cases are created, with a particular focus on test case selection (choosing a subset of tests to run, e.g., during regression testing) and test case prioritization (ordering tests so those most likely to detect faults run earlier). The aim of **Test Case Prioritization (TCP)** is to schedule tests to maximize objectives such as early fault detection or coverage. Machine learning and meta-heuristic search methods are widely used for this. For instance, classifiers can predict the likelihood of a test revealing a fault based on historical test failures and code changes, enabling ranking by expected value. Reinforcement learning (RL) is also prominent: RL agents learn to select and order tests dynamically by receiving feedback on test outcomes, adapting strategies over time [34]. Su et al. introduced an attention-transfer RL method for TCP in Continuous Integration (CI) environments, allowing prioritization models to adapt between individual test features and broader suite patterns, thereby improving adaptability and fault detection ordering across CI scenarios [35, 36]. Such RL-based approaches are promising for CI, where time constraints require constant test prioritization, and learning-based models can refine their rankings as they observe test failures after code changes [37].

Regression test selection focuses on running only those tests relevant to recent software changes. While traditional methods rely on dependency analysis, AI augments this by learning from historical data, which tests are most likely to catch faults after specific code changes [38]. This has been approached as an information retrieval or recommender system problem, matching tests to code commits [39].

AI is also employed to create a **self-healing testing systems** making test execution more robust. Anomaly detection on test logs can identify flaky tests (which pass and fail inconsistently due to environmental or non-deterministic issues) [40].

In large-scale environments, AI can **optimize how tests are allocated and parallelized**. By forecasting runtimes and failure probabilities, AI-driven schedulers can allocate resources to maximize feedback speed and minimize waste, for example, by scheduling likely-to-fail short tests first or evolving test orders through genetic algorithms to optimize multiple objectives (e.g., fault detection, coverage, execution time) [41].

Despite the benefits, several challenges exist. Models may become outdated if development practices change, requiring continuous learning and adaptation – something RL can help address. The benefits of AI-driven selection are most significant in large, time-constrained suites (e.g., CI for large projects); its value is reduced in small or cheap-to-run test suites. Safety-critical domains may be slower in adopting AI selection due to risk concerns. Nonetheless, studies show that AI-based prioritization improves early fault detection and generalizes across projects [42]. Future research may investigate federated learning for cross-project adaptation and deep learning approaches that predict affected tests directly from code changes.

Conclusion and future research directions

The review demonstrates that up to review date the Kolmogorov-Arnold Networks were not applied to software testing tasks but other AI methods became increasingly vital to software quality control and testing, delivering notable

advancements across test automation, defect prediction, and non- functional testing such as performance and security analysis [43]. AI techniques – including machine learning, deep learning, evolutionary algorithms, and NLP – have enabled greater test coverage, reduced manual effort, faster fault detection, and more intelligent allocation of testing resources [44]. AI-driven tools streamline test generation and maintenance, often catching bugs overlooked by manual approaches, while ML-guided fuzzing has advanced vulnerability discovery. Early identification of risky components through ML enables proactive quality actions [45, 46].

However, several challenges persist. The “oracle problem” remains unresolved; fully automated testing often cannot determine correct outputs without human or formal input. AI-generated tests may only indicate that an event occurred without verifying its correctness [45, 51].

Data dependency is another barrier: supervised models require representative historical data, which may be unavailable, and even when present, model results must be interpreted by engineers. Transparency and trust are ongoing issues – testers and developers may resist ”black-box” AI quality judgments [48]. Certain testing stages, such as usability or requirements validation, also rely on human expertise, where AI offers little assistance. These gaps suggest several future research directions [49].

Progress is needed in automating oracles. Promising directions include leveraging AI to learn expected behaviors or generating metamorphic relations, enabling the creation of assertions for AI-generated tests to check correctness automatically [47]. Integrating specification mining with AI could further support this goal.

Advances in NLP and large language models (LLMs) offer opportunities for AI assistants that interpret requirements and collaborate with testers to generate or refine test scenarios, improving both requirements coverage and clarity.

To keep pace with rapidly evolving software, research should pursue AI that continuously adapts in CI/CD environments, learning from new test outcomes and code changes without manual retraining. Online learning and feedback from production (e.g., DevOps telemetry) could yield more context-aware, up-to-date testing models [50].

While most current research applies individual AI techniques, future systems should combine multiple approaches for holistic QA pipelines. For example, a predictive model could flag risky components, an evolutionary algorithm generate targeted tests, deep learning models cluster failures, and a recommender system suggest fixes – yielding automated, end-to-end QA processes [50].

Rather than aiming for fully autonomous testing, an effective path forward is interactive tools that let testers guide and refine AI-generated tests. Human-in-the-loop approaches leverage human domain knowledge alongside AI’s automation speed, and transparent AI explanations will foster trust and adoption.

Standard benchmarks and datasets are needed for rigorous, comparable evaluation of AI testing techniques. Establishing guidelines or standards for AI use in safety-critical contexts (e.g., healthcare, automotive) will encourage adoption in high- assurance industries.

While AI is making strides in security, further research should extend to attributes such as privacy, ethical compliance, and accessibility.

References

1. BrowserStack: Functional testing: Definition, types & examples (January 2025). URL: https://www.browserstack.com/guide/functional-testing

2. BrowserStack: What is non-functional testing? Definition, types, and tools (January 2025). URL: https://www.browserstack.com/guide/what-is-non-functional-testing

3. The Apache Software Foundation: Apache jmeter (2025). URL: https://jmeter.apache.org/

4. OWASP: Free for open source application security tools (2025). URL: https://owasp.org/www-community/Free_for_Open_Source_Application_Security_Tools

5. Jia, Y., Harman, M.: An analysis and survey of the development of mutation testing. IEEE Transactions on Software Engineering 37(5), 649–678 (2010). doi: 10.1109/TSE.2010.62

6. Alshayeb, M.: Empirical investigation of refactoring effect on software quality. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) 13(2), 1823–1832 (2023). doi: 10.11591/ijece.v13i2.pp1823-1832

7. Harman, M., McMinn, P.: A theoretical and empirical study of search- based testing: Local, global, and hybrid search. IEEE Transactions on Software Engineering 36(2), 226–247 (2009). doi: 10.1109/TSE.2009.71

8. Ricca, F., Marchetto, A., Stocco, A.: Ai-based test automation: A grey literature analysis. 2021 IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation Work- shops pp. 263–270 (2021). doi: 10.1109/ICSTW52544.2021.00051

9. Politowski, C., Guéhéneuc, Y., Petrillo, F.: Towards automated video game testing. Proceedings of the 1st International Workshop on Search-Based Software Engineering pp. 57–64 (2022). doi: 10.1145/3524494.3527627

10. Dobrovolskyi, H., Keberle, N.: Obtaining the minimal terminologically saturated document set with controlled snowball sampling. In: CEUR Workshop Proceedings. vol. 2740, pp. 87–101 (2020).

11. Ali, S., Briand, L., Hemmati, H., Panesar-Walawege, R. K.: A systematic review of the application and empirical investigation of search-based test case generation. IEEE Transactions on Software Engineering 36(6), 742–762 (2009). doi: 10.1109/TSE.2009.52

12. Su, T., Meng, G., Chen, Y., Wu, K., Yang, W., Yao, Y., Pu, G., Liu, Y., Su, Z.: Guided, stochastic model-based gui testing of android apps. In: Proceedings of the 2017 10th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering (ESEC/FSE). pp. 245–256 (2017). doi: 10.1145/3106237.3106298

13. Liu, Z., Chen, C., Wang, J., Chen, M., Wu, B., Che, X., Wang, D., Wang, Q.: Make llm a testing expert: Bringing human-like interaction to mobile gui testing via functionality-aware decisions. Proceedings of the 46th International Conference on Software Engineering pp. 1–13 (2024). doi: 10.1145/3597503.3639180

14. Fraser, G., Wyrich, M.: State of the art in search based software testing: A report from the sbst'18 tool competition (2018).

15. Arcuschin, I. G., Rojas, J. M., Fraser, G., Campos, J.: Evosuite at the sbst 2020 tool competition. In: 2020 IEEE/ACM 13th International Workshop on Search-Based Software Testing (SBST). pp. 33–36. IEEE (2020). doi: 10.1145/3387940.3392186

16. Fraser, G., Zeller, A.: Mutation-driven generation of unit tests and oracles. Proceedings of the 19th International Symposium on Software Testing and Analysis pp. 147–158 (2010). doi: 10.1145/1831708.1831728

17. Dong, Z., Böhme, M., Cojocaru, L., Roychoudhury, A.: Time-travel testing of android apps. Proceedings of the ACM/IEEE 42nd International Conference on Software Engineering pp. 687–698 (2020). doi: 10.1145/3377811.3380402

18. Alagarsamy, S., Tantithamthavorn, C., Takerngsaksiri, W., Arora, C., Aleti, A.: Enhancing large language models for text-to-testcase generation. arXiv preprint arXiv:2402.11910 (2024).

19. Li, Z., Harman, M., Hierons, R.M.: Search algorithms for regression test case prioritization. IEEE Transactions on Software Engineering 33(4), 225–237 (2007). doi: 10.1109/TSE.2007.38

20. Ellis, K., Wong, L., Nye, M., Sablé-Meyer, M., Morales, L., Hewitt, L., Solar-Lezama, A., Tenenbaum, J. B.: Dreamcoder: Growing generalizable, interpretable knowledge with wake-sleep bayesian program learning (2023). doi: 10.48550/arXiv.2307.00404

21. Spichkova, M., Muxiddinova, N.: Automated analysis of the scrum agile process using process mining. In: Proceedings of the 15th International Conference on Evaluation of Novel Approaches to Software Engineering (ENASE). pp. 266–274. SCITEPRESS – Science and Technology Publications (2020). doi: 10.5220/0009417802660274

22. Diffblue: What is diffblue cover? (March2025). URL: https://www.diffblue.com/diffblue-cover/

23. Liu, P., Zhang, X., Pistoia, M., Zheng, Y., Marques, M., Zeng, L.: Automatic text input generation for mobile testing. 2017 IEEE/ACM 39th International Conference on Software Engineering pp. 643–653 (2017). doi: 10.1109/ICSE.2017.65

24. Gu, T., Cao, C., Liu, T., Sun, C.P., Deng, J., Ma, X., Lü, J.: Aimdroid: Activity-insulated multi-level automated testing for android applications. 2017 IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution pp. 103–114 (2017). doi: 10.1109/ICSME.2017.72

25. Liu, Z., Chen, C., Wang, J., Che, X., Huang, Y.K., Hu, J., Wang, Q.: Fill in the blank: Context-aware automated text input generation for mobile gui testing. 2023 IEEE/ACM 45th International Conference on Software Engineering pp. 1355–1367 (2023). doi: 10.1109/ICSE48619.2023.00119

26. Mao, K., Harman, M., Jia, Y.: Sapienz: Multi-objective automated testing for android applications. In: Proceedings of the 38th International Conference on Software Engineering (ICSE). pp. 352–362 (2016). doi: 10.1145/2931037.2931054

27. Barr, E.T., Harman, M., McMinn, P., Shahbaz, M., Yoo, S.: The oracle problem in software testing: A survey. IEEE Transactions on Software Engineering 41(5), 507–525 (2014). doi: 10.1109/TSE.2014.2372785

28. Fraser, G., Arcuri, A.: Evosuite. Proceedings of the 19th ACM SIG-SOFT Symposium and the 13th European Conference on Foundations of Software Engineering pp. 416–419 (2011). doi: 10.1145/2025113.2025179

29. Malhotra, R.: A systematic review of machine learning techniques for software fault prediction. Applied Soft Computing 27, 504–518 (2015). doi: 10.1016/j.asoc.2014.11.023

30. Alshammari, A., Morris, C., Hilton, M., Bell, J.: Flake- flagger: Predicting flakiness without rerunning tests. 2021 IEEE/ACM 43rd International Conference on Software Engineering pp. 1572–1584 (2021). doi: 10.1109/ICSE43902.2021.00140

31. Wang, Y., Jia, P., Liu, L., Huang, C., Liu, Z.: A systematic review of fuzzing based on machine learning techniques. PLOS ONE 15(8), e0237749 (2020). doi: 10.1371/journal.pone.0237749

32. Xie, Q., Memon, A.M.: Designing and comparing automated test oracles for guibased software applications. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology 16(1), 4 (2007). doi: 10.1145/1189748.1189752

33. Basavegowda Ramu, V.: Performance testing using machine learning. SSRG International Journal of Computer Science and Engineering 10(6), 36–42 (2023). doi: 10.14445/23488387/IJCSE-V10I6P105

34. Li, Z., Harman, M., Hierons, R.M.: Search algorithms for regression test case prioritization. IEEE Transactions on Software Engineering 33(4), 225–237 (2007). doi: 10.1109/TSE.2007.38

35. Su, Q., Li, X., Ren, Y., Qiu, R., Hu, C., Yin, Y.: Attention transfer reinforcement learning for test case prioritization in continuous integration. Applied Sciences 15(4), 2243 (2025). doi: 10.3390/app15042243

36. Pinto, G., Miranda, B., Dissanayake, S., d'Amorim, M., Treude, C., Bertolino, A.: What is the vocabulary of flaky tests? Proceedings of the 17th International Conference on Mining Software Repositories pp. 492–502 (2020). doi: 10.1145/3379597.3387482

37. Chekam, T. T., Papadakis, M., Traon, Y. L., Harman, M.: An empirical study on mutation, statement and branch coverage fault revelation that avoids the unreliable clean program assumption. 2017 IEEE/ACM 39th International Conference on Software Engineering pp. 597–608 (2017). doi: 10.1109/ICSE.2017.61

38. Abdessalem, R. B., Nejati, S., Briand, L., Stifter, T.: Testing vision-based control systems using learnable evolutionary algorithms. 2018 IEEE/ACM 40th International Conference on Software Engineering pp. 1016–1026 (2018). doi: 10.1145/3180155.3180160

39. Zhang, X., Li, Y., Wang, Z.: Rtl regression test selection using machine learning. In: Proceedings of the 27th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC). pp. 1–6 (2022). doi: 10.1109/ASP-DAC52403.2022.9712550

40. Mohammed, A. S., Boddapati, N., Mallikarjunaradhya, V., Jiwani, N., Sreeramulu, M. D., Natarajan, Y.: Optimizing real-time task scheduling in cloud-based ai systems using genetic algorithms. In: Proceedings of the 7th International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I). pp. 1649–1654 (2025). doi: 10.1109/IC3I61595.2024.10829055, doi: 10.5220/0009417802660274

41. A multi-objective optimization design to generate surrogate machine learning models for predictive maintenance. Computers in Industry (2023). doi: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2193943823000134

42. Su, T., Meng, G., Chen, Y., Wu, K., Yang, W., Yao, Y., Pu, G., Liu, Y., Su, Z.: Guided, stochastic model-based gui testing of android apps. In: Proceedings of the 2017 10th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering (ESEC/FSE). pp. 245–256 (2017). doi: 10.1145/3106237.3106298

43. Leotta, M., Ricca, F., Marchetto, A., Olianas, D.: An empirical study to compare three web test automation approaches: Nlp and capturereplay. Journal of Software: Evolution and Process 35(9), e2606 (2023). doi: 10.1002/smr.2606

44. Harman, M., Hassoun, Y., Lakhotia, K., McMinn, P., Wegener, J.: The impact of input domain reduction on search-based test data generation. Proceedings of the the 6th Joint Meeting of the European Software Engineering Conference and the ACM SIGSOFT Symposium on The Foundations of Software Engineering pp. 155–164 (2007). doi: 10.1145/1287624.1287647

45. Su, T., Wang, J., Su, Z.: Benchmarking automated gui testing for android against real-world bugs. Proceedings of the 29th ACM Joint Meeting on European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering pp. 119–130 (2021). doi: 10.1145/3468264.3468620

46. Chen, X., Hu, X., Yuan, H., Jiang, H., Ji, W., Jiang, Y., Jiang, Y., Liu, B., Liu, H., Li, X., Lian, X., Meng, G., Xin, P., Sun, H., Shi, L., Wang, B., Wang, C., Wang, J., Wang, T., Xuan, J., Xia, X., Yang, Y., Yang, Y., Li, Z., Zhou, Y., Zhang, L.: Deep learning-based software engineering: Progress, challenges, and opportunities. Science China Information Sciences 67(5), 150101 (2024). doi: 10.1007/s11432-023-4127-5

47. Choudhary, S.R., Gorla, A., Orso, A.: Automated test input generation for android: Are we there yet? arXiv preprint (2015). doi: 10.48550/arXiv.1503.07217

48. Harman, M., Hassoun, Y., Lakhotia, K., McMinn, P., Wegener, J.: The impact of input domain reduction on search-based test data generation. Proceedings of the 6th Joint Meeting of the European Software Engineering Conference and the ACM SIGSOFT Symposium on The Foundations of Software Engineering pp. 155–164 (2007). doi: 10.1145/1287624.1287647

49. Adamsen, C.Q., Mezzetti, G., Møller, A.: Systematic execution of android test suites in adverse conditions. Proceedings of the 2015 International Symposium on Software Testing and Analysis pp. 83–93 (2015) doi: 10.1145/2771783.2771786

50. Harman, M., McMinn, P.: A theoretical empirical analysis of evolutionary testing and hill climbing for structural test data generation. Proceedings of the 2007 International Symposium on Software Testing and Analysis pp. 73–83 (2007). doi: 10.1145/1273463.1273475

51. Ji T., Hou Y., Zhang D. A comprehensive survey on Kolmogorov-Arnold Networks (KAN). arXiv preprint arXiv:2407.11075. 2024. DOI 10.48550/arXiv.2407.11075

УДК 004.8:519.816:65.011 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.38

О. Ю. РИХАЛЬСЬКИЙ
викладач кафедри комп'ютерних наук та програмної інженерії
Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»
ORCID: 0009-0000-6892-9420

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ТА СИСТЕМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПІДПРИЄМСТВ

Стаття присвячена дослідженню процесів побудови моделей прийняття рішень та впровадження систем штучного інтелекту на підприємствах як інструментів удосконалення управління бізнес-процесами. Мета статті – показати особливості розроблення моделей прийняття рішень в бізнесі на основі штучного інтелекту. В ході наукового дослідження використовувалися загальнонаукові методи пізнання, зокрема аналіз, синтез, індукція, дедукція, порівняння, узагальнення та системний підхід. Результати дослідження показують, що в сучасному динамічному бізнес-середовищі моделювання відіграє центральну роль в ухваленні стратегічних рішень, дозволяючи підприємствам знижувати ризики та підвищувати ефективність управління. Традиційні методи моделювання, зокрема статистичне та лінійне, залишаються базовим інструментом для аналізу та прогнозування, проте їх можливостей уже недостатньо в умовах підвищеної невизначеності. Встановлено, що новітні підходи, серед яких сценарне планування та технології штучного інтелекту, забезпечують гнучкість, адаптивність і глибший рівень аналітики, значно розширюючи межі традиційного бізнес-моделювання. Досліджено, що системи штучного інтелекту відіграють ключову роль у трансформації процесів прийняття рішень, надаючи інструменти для аналізу великих обсягів даних, прогнозування тенденцій, виявлення прихованих взаємозв'язків і персоналізації клієнтського досвіду. Показано, що ці системи здатні не лише обробляти інформацію в режимі реального часу, а й навчатися на основі зібраних даних, використовуючи алгоритми машинного навчання та нейронні мережі. Така здатність до самоадаптації дозволяє системам ШІ прогнозувати наслідки різних управлінських рішень, здійснювати багатофакторний аналіз і автоматично визначати оптимальні стратегії дій у непередбачуваних умовах. Зроблено висновок, що використання таких систем забезпечує підприємствам стратегічну перевагу, дозволяючи їм бути більш гнучкими, інноваційними та конкурентоспроможними. Практичне значення дослідження полягає у формуванні рекомендацій щодо впровадження інтелектуальних систем управління для підвищення адаптивності та ефективності підприємств в умовах цифрової трансформації.

Ключові слова: *моделювання, штучний інтелект, прийняття рішень, бізнес-процеси, адаптивність.*

O. YU. RYKHALSKYY
Lecturer at the Department of Computer Science
and Software Engineering
Private Higher Education Institution "European University"
ORCID: 0009-0000-6892-9420

DEVELOPMENT OF DECISION-MAKING MODELS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS FOR ENTERPRISES

The article explores the processes of building decision-making models and implementing artificial intelligence systems in enterprises as tools for improving business process management. The purpose of the article is to highlight the specific features of developing decision-making models in business based on artificial intelligence. The study employed general scientific methods of cognition, such as analysis, synthesis, induction, deduction, comparison, generalization, and a systems approach. The findings show that in today's dynamic business environment, modeling plays a central role in strategic decision-making, helping companies reduce risks and increase management efficiency. Traditional modeling methods, including statistical and linear approaches, remain fundamental tools for analysis and forecasting, but their capabilities are no longer sufficient under conditions of heightened uncertainty. It was found that modern approaches, such as scenario planning and artificial intelligence technologies, offer flexibility, adaptability, and a deeper level of analytics, significantly expanding the boundaries of traditional business modeling. The research reveals that artificial intelligence systems play a key role in transforming decision-making processes by providing tools for analyzing large volumes of data, forecasting trends, identifying hidden correlations, and personalizing customer experiences. These systems are capable not only of processing information in real time, but also of learning from collected data using machine learning algorithms and neural networks. This ability to self-adapt enables AI systems to predict the outcomes of various management decisions, conduct multifactor analysis, and automatically determine optimal action strategies under unpredictable conditions. The study concludes that the use of such systems provides enterprises with a strategic advantage, allowing them to become more flexible, innovative, and competitive. The practical value of the research lies in developing recommendations for implementing intelligent management systems to enhance the adaptability and efficiency of enterprises in the context of digital transformation.

Key words: *modeling, artificial intelligence, decision-making, business processes, adaptability.*

Постановка проблеми

Інтеграція цифрових інструментів в управлінські процеси бізнесу відіграє важливу роль у підтримці та адаптації бізнесу до нових викликів. Зокрема, в умовах глобальних змін та високого рівня конкуренції компанії швидко реагують на потреби ринку, впроваджуючи передові цифрові рішення. Вже сьогодні ERP-системи, такі як SAP та Microsoft Dynamics, використовуються для ефективного управління ресурсами підприємства, забезпечуючи оптимізацію процесів та підвищення продуктивності. Крім того, для малих та середніх підприємств стають популярними програми, такі як QuickBooks та Zoho Books, які надають простіші та економічніші рішення для фінансового обліку, бюджетування та управління грошовими потоками [8].

Штучний інтелект (ШІ) швидко виходить за рамки дослідницьких лабораторій і стає важливою частиною бізнес-світу. Завдяки ШІ підприємства з різних галузей, від виробництва до здоров'я та автомобілебудування, використовують передові технології для оптимізації бізнес-процесів і підвищення якості обслуговування клієнтів [4]. Серед сфер бізнесу, які активно інтегрують штучний інтелект, лідирує галузь комп'ютерів та електроніки, де ШІ використовується в 17 % компаній, займаючи чільне місце за рівнем впровадження цих технологій. Також значну частку застосування штучного інтелекту має автомобільний бізнес, де показник становить 12 %. Ці сектори вирізняються високим рівнем автоматизації процесів та потребою у постійних інноваціях [7].

Згідно з прогнозами McKinsey, штучний інтелект може додати приблизно 13 трильйонів доларів до світової економіки до 2030 року, що підкреслює важливість розуміння та використання цієї технології. Враховуючи переваги штучного інтелекту, багато організацій вже сьогодні впроваджують бізнес-моделі на основі ШІ – це стратегії, які інтегрують ШІ у ключові операції для стимулювання вартості та забезпечення конкурентної переваги. Перед тим, як розглядати, як зробити бізнес-стратегію більш орієнтованою на ШІ, розглянемо більш детально особливості бізнес-моделювання [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання розробки моделей прийняття рішень та систем штучного інтелекту для підприємств є достатньо досліджені у вітчизняній та зарубіжній науковій літературі. Значний внесок у розвиток теми зробила Л. Буяк [6], яка розглядає моделі підтримки прийняття рішень у контексті безпекознавчого підходу до управління підприємствами мережевих структур, підкреслюючи важливість адаптивних систем в умовах невизначеності. В. С. Дерба [7] звертає увагу на інструментальну роль штучного інтелекту у вдосконаленні бізнес-процесів, акцентуючи на його здатності до оптимізації управлінських функцій. О. Дороніна та В. Дядій [8] аналізують як переваги, так і потенційні ризики застосування ШІ у прийнятті управлінських рішень, зокрема, вказуючи на необхідність етичного та правового регулювання таких процесів. Д. Дриньов, В. Загородніх та О. Зінченко [9] висвітлюють практичні аспекти інтеграції ШІ у систему управління підприємством, наголошуючи на стратегічному значенні цифрової трансформації. А.В. Півнюк [10] досліджує загальні тенденції використання ШІ в сучасній діяльності підприємств, вказуючи на його потенціал у забезпеченні конкурентоспроможності.

Для дослідження використовувалася і експертна література, зокрема публікації у сучасних інтернет-виданнях, як-от: Distillery [1], Harvard Business School Online [2], Addepto [3], SmartDev [5], які висвітлюють сучасні аспекти створення та реалізації моделей ШІ у бізнесі, зокрема з практичного боку.

Попри достатню кількість літератури з даної теми, відчувається нестача систематизованого матеріалу, що охоплює як теоретичні основи, так і прикладні механізми впровадження ШІ у бізнес-процеси. Тому із використанням різних методів наукового пізнання було проаналізовано, погруповано, систематизовано інформацію і подано у світлі теми дослідження.

Формулювання мети дослідження

Мета статті – показати особливості розроблення моделей прийняття рішень в бізнесі на основі штучного інтелекту.

Викладення основного матеріалу дослідження

Бізнес-моделювання є важливою частиною менеджменту, що дозволяє знизики ризики прийняття рішень. В основі традиційної концепції бізнес моделювання стоїть математичне моделювання, яке є є фундаментальним інструментом в управлінні підприємствами, особливо коли мова йде про аналіз економічних показників та прогнозування їх змін. Основна мета такого моделювання полягає в забезпеченні можливості кількісного оцінювання поточних даних та вибору оптимальних стратегій на основі системного аналізу. Традиційно математичне моделювання використовує лінійне, статистичне та стратегічне моделювання [6].

Проте, існують обмеження в застосуванні цих методів. Наприклад, для нових підприємств може бракувати історичних даних для ефективного моделювання. Умови високої невизначеності та інноваційна діяльність також створюють виклики, оскільки стандартні моделі можуть не враховувати потенційні ризики та непередбачувані зміни в ринковому середовищі. Для адаптації до цих викликів, бізнес-моделювання включає сценарне планування, кластерні моделі, генеративні моделі, моделі зменшення втрат [3] та аналіз чутливості, що дозволяє оцінювати різні майбутні умови та розуміти вплив змін у вхідних параметрах на вихідні показники. Це сприяє кращому розумінню ризиків та більш обґрунтованому прийняттю рішень у бізнесі.

Застосування штучного інтелекту (ШІ) в бізнес-моделюванні може значно підсилити здатність компаній адаптуватися до складних умов, які характеризуються високим рівнем невизначеності, інноваційної активності та інвестицій. ШІ дозволяє покращити точність прогнозів, оптимізувати процеси та зробити управлінське рішення більш обґрунтованим і ефективним.

На відміну від традиційного програмного забезпечення, яке виконує конкретні завдання, слідуючи чітко заданим інструкціям, моделі штучного інтелекту розроблені так, щоб навчатися та адаптуватися, виходячи з даних, що надходять. Іншими словами, замість покладання на попередньо запрограмовані правила, моделі ШІ вдосконалюються з часом, аналізуючи нові дані, що робить їх значно більш гнучкими і здатними справлятися зі складними, непередбачуваними сценаріями [5].

Розробка спеціалізованих моделей та систем ШІ дозволяє підприємствам прогнозувати ринкові тенденції, оптимізувати процеси та мінімізувати ризики. Системи ШІ можуть ефективно обробляти та аналізувати великі обсяги даних, виявляючи приховані закономірності та забезпечуючи глибокий аналіз ринкової ситуації. Це забезпечує базу для прийняття обґрунтованих рішень, зокрема в умовах невизначеності. На думку Дороніної О. А. та Дядія В. О., використання ШІ є стратегічно важливим для формулювання довгострокових планів та адаптації до швидко змінних зовнішніх умов.

Таблиця 1

Аналітичні можливості штучного інтелекту в контексті прийняття рішень на підприємствах

Можливість	Особливості
Обробка великих даних	ШІ аналізує дані з різних джерел, включаючи IoT-пристрої та біометричні дані, для виявлення тенденцій
Реальночасова аналітика	ШІ дозволяє обробляти величезні масиви даних в реальному часі, що допомагає бізнесу швидко реагувати на зміни та приймати рішення
Прогнозування	ШІ використовує передові алгоритми для прогнозування поведінки ринку та оптимізації бізнес-операцій
Аналіз ринку та клієнтів	ШІ досліджує поведінку клієнтів в реальному часі для вдосконалення продуктів і маркетингових стратегій
Візуалізація даних	ШІ створює детальні візуалізації, сприяючи кращому розумінню складних даних та підтримці рішень

Примітка: систематизовано автором на основі [4, 8]

Окрім безпосереднього моделювання, штучний інтелект використовується для різноманітних процесів, які мають безпосередній вплив на процеси прийняття бізнес-рішень. Крім того, розвиток ШІ сприяє створенню інтелектуальних мініатюрних та мікрочіпів, які оптимізують роботу програмного забезпечення та покращують ефективність обробки даних. Ці чіпи, розроблені компаніями як Intel, AMD, NVIDIA та Qualcomm, спеціалізуються на підтримці функцій штучного інтелекту, таких як обробка природної мови, розпізнавання образів та голосу, що відкриває нові можливості для інновацій у багатьох секторах [4].

ШІ використовується не тільки як інструмент для аналітики та прогнозування, але й сприяє оптимізації робочих процесів, персоналізації обслуговування клієнтів та управлінню ланцюгами постачання, що в цілому підвищує ефективність прийняття рішень на підприємстві. Це показано в основній сфері застосування штучного інтелекту, представленій у таблиці 2.

Таблиця 2

Сфери використання ШІ для прийняття бізнес-рішень

Сфера застосування ШІ	Опис
Автоматизація рутинних завдань	ШІ автоматизує повторювальні процеси, зокрема обробку запитів клієнтів, управління запасами та бухгалтерські операції, знижуючи навантаження на працівників [7]
Автоматизоване машинне навчання	Автоматизація ML дозволяє аналітикам та розробникам просувати розробку моделей без традиційного процесу навчання, використовуючи готові алгоритми [4]
Персоналізація обслуговування клієнтів	ШІ дозволяє створювати персоналізовані досвіди для клієнтів, використовуючи системи рекомендацій, що адаптують товари та послуги до індивідуальних потреб [7]
Оптимізація ланцюгів постачання	ШІ покращує управління ланцюгами постачання, прогнозуючи попит, оптимізуючи маршрути доставки і знижуючи витрати, автоматично коригуючи запаси [7]
Управління ризиками та безпека	ШІ сприяє ідентифікації і управлінню ризиками через моніторинг аномалій у фінансових транзакціях та покращення кібербезпеки [7]
Аналіз конкурентного середовища	ШІ допомагає в аналізі дій конкурентів та ринкових трендів, швидкому реагуванні на зміни на ринку і адаптації стратегій [7]
Інноваційний розвиток продуктів	ШІ сприяє розробці нових продуктів і послуг через аналіз ринкових потреб, виявлення інноваційних можливостей і генерацію ідей для покращення продукції [7]
Підвищення продуктивності працівників	Впровадження ШІ у робочі процеси дозволяє звільнити працівників від рутинних завдань, зосередивши їх на більш творчих і стратегічних аспектах роботи [7]
Поліпшення безпеки даних	ШІ ефективно виявляє шахрайство та незаконний доступ у фінансовому секторі, забезпечуючи захист даних [4]

Примітка: систематизовано автором на основі [4,7]

Для ефективного застосування ШІ в управлінні, необхідно виконати кілька важливих умов:

– Доступ до якісних даних: рішення, ухвалені на основі аналізу точних та актуальних даних, значно підвищують шанси на успіх.

– Потужна технічна інфраструктура: сучасне обладнання та програмне забезпечення є невід'ємною частиною для обробки великих обсягів даних і реалізації складних алгоритмів ШІ.

– Розвинені цифрові навички у менеджерів: знання та вміння управлінського персоналу використовувати цифрові інструменти значно підсилюють ефективність прийняття рішень.

– Чітка ціль управлінських рішень: визначення конкретних цілей дозволяє точно оцінити ефективність рішень та їхній вплив на бізнес.

– Організаційна культура: етичне використання ШІ та прозорість у його застосуванні забезпечують довіру та відповідність корпоративним цінностям [8].

Дриньов Д., Загородніх В., Зінченко О. зазначають, що використання штучного інтелекту в системах управління бізнес-процесами може мати деякі недоліки та обмеження. Ефективна робота систем штучного інтелекту вимагає доступу до великої кількості якісних та репрезентативних даних. Нестача або погана якість даних може спричинити недостовірні результати та помилкові висновки. Крім того, інтеграція штучного інтелекту з вже існуючими системами управління може потребувати значних вкладень у модернізацію інфраструктури та освіту персоналу [9].

Стратегічне планування, адекватний вибір інструментів, ефективне управління даними, а також навчання персоналу є невід'ємними компонентами успішного впровадження ШІ у бізнес-процеси. Інвестиції в людські ресурси та їх навчання є також критично важливими для використання потенціалу цифрових технологій.

Що стосується безпосереднього моделювання процесів прийняття рішень у бізнесі, то тут варто розглянути ключові технології, які використовує ШІ для цього процесу.

Побудова сценаріїв. ШІ дозволяє проводити сценарний аналіз, що включає в себе моделювання різних варіантів дій та їх наслідків у змінних умовах. Це може бути особливо корисно у ситуаціях, де необхідно оцінити ризики і потенційні вигоди від різних стратегічних альтернатив. Використовуючи алгоритми машинного навчання, системи ШІ можуть передбачити майбутні тенденції та наслідки різних рішень, дозволяючи керівництву компанії робити обґрунтовані та своєчасні вибори.

Вибір кращих рішень. ШІ може використовуватися для вибору найкращих рішень заснованих на конкретних параметрах, таких як вартість, час, якість, або їх комбінація. Це досягається шляхом оптимізації процесів та ресурсів. Наприклад, в операціях ланцюга постачань ШІ може рекомендувати стратегії оптимізації запасів, які мінімізують витрати та час доставки [10].

Багатофакторний аналіз. Додатково, ШІ здатний виконувати багатофакторний аналіз, що дозволяє оцінити вплив різноманітних змінних і їх комбінацій на можливі сценарії. Цей аналіз включає збір і обробку великих масивів даних для визначення взаємозв'язків між факторами, які можуть вплинути на бізнес. Таке комплексне дослідження допомагає зрозуміти, як різні аспекти впливають на стратегічні рішення, що сприяє кращому прогнозуванню результатів і відповідному їх коригуванню.

Ще один важливий аспект використання ШІ у процесі прийняття рішень – це його здатність до неперервного навчання та самовдосконалення через техніку зворотного зв'язку. ШІ не просто виконує аналіз на основі наявних даних, а й адаптує свої алгоритми відповідно до нових інформацій та змін у зовнішньому середовищі. Це робить системи штучного інтелекту особливо ефективними у динамічних умовах, де швидкість реагування та здатність адаптації можуть значно вплинути на успіх компанії.

Висновки

У сфері управління бізнес-процесами моделювання відіграє ключову роль, дозволяючи підприємствам мінімізувати ризики та оптимізувати стратегічні вибори. Традиційні методи, такі як статистичне та лінійне моделювання, забезпечували базовий фундамент для аналізу та прогнозування бізнес-показників. Проте, з розвитком технологій і появою високої невизначеності в бізнес-середовищі, з'явилася потреба в більш гнучких та адаптивних системах.

Сучасні підходи, такі як сценарне планування та використання штучного інтелекту, надають підприємствам засоби для глибшого аналізу та більш точного прогнозування, розширюючи традиційні межі бізнес-моделювання. Штучний інтелект революціонізував процес прийняття рішень на підприємствах, надаючи засоби для аналізу великих даних, реальночасової аналітики, прогнозування тенденцій та персоналізації обслуговування клієнтів.

Системи ШІ можуть обробляти інформацію з неймовірною швидкістю та точністю, виявляючи складні взаємозв'язки, які можуть залишитися непоміченими людиною. Це забезпечує важливу перевагу в умовах швидко змінювальних ринкових умов і сприяє стратегічному плануванню та адаптації до нових бізнес-викликів.

Системи штучного інтелекту не тільки виконують аналіз, але й постійно вчаться та адаптуються до нових умов, використовуючи техніки машинного навчання та нейронні мережі. Вони можуть прогнозувати наслідки різних стратегічних виборів, виконувати багатофакторний аналіз та оптимізувати процеси на основі реального

аналізу даних. Такий підхід відрізняється від традиційних систем, оскільки ШІ може самостійно ідентифікувати оптимальні рішення в умовах невизначеності та змін, надаючи підприємствам унікальну здатність до інновацій та швидкої адаптації до ринкових вимог.

Список використаної літератури

1. From Concept to Practice: Applying AI Models in Business. distillery.com, 2024. URL: https://distillery.com/blog/from-concept-to-practice-applying-ai-models-in-business/
2. Gibson K. AI-Driven Business Models: 4 Characteristics. online.hbs.edu, 2024. URL: https://online.hbs.edu/blog/post/ai-driven-business-models
3. Haponik A. How to Make an AI Model: A Practical Guide for Enterprises. addepto.com, 2024. URL: https://addepto.com/blog/how-to-make-an-ai-model-a-practical-guide-for-enterprises/
4. Mishra S., Tripathi A.R. AI business model: an integrative business approach. J Innov Entrep, 2021, № 10(18). DOI: https://doi.org/10.1186/s13731-021-00157-5
5. Ta P. A. How to Create an AI Model for Your Business. smartdev.com, 2025. URL: https://smartdev.com/how-to-create-an-ai-model-for-your-business/
6. Буяк Л. Моделі підтримки прийняття рішень в управлінні підприємствами мережевих структур: безпекознавчий базис. Вісник Хмельницького національного університету, 2024, № 1. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-326-10
7. Дерба В. С. Штучний інтелект як інструмент вдосконалення ключових бізнес-процесів підприємства. Здобутки економіки: перспективи та інновації, 2024, № 8. URL: https://doi.org/10.5281/zenodo.13284225
8. Дороніна О., Дядій В. Використання штучного інтелекту у процесі прийняття управлінських рішень: ризики та переваги. Економіка і організація управління, 2025, № 1, 53–61. DOI: https://doi.org/10.31558/2307-2318.2024.3.6
9. Дриньов Д., Загородніх В., Зінченко О. Застосування штучного інтелекту у системі управління підприємством. Економічний простір, 2023, № 188, 79–82. DOI: https://doi.org/10.32782/2224-6282/188-13
10. Півнюк А. В. Використання штучного інтелекту в сучасній діяльності підприємств. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Економіка і управління, 2024, № 4, 70–74. DOI: https://doi.org/10.32782/2523-4803/74-4-12

References

1. Distillery. (2024). From concept to practice: Applying AI models in business. URL: https://distillery.com/blog/from-concept-to-practice-applying-ai-models-in-business/ [In English].
2. Gibson K. (2024). AI-driven business models: 4 characteristics. URL: https://online.hbs.edu/blog/post/ai-driven-business-models [In English].
3. Haponik A. (2024). How to make an AI model: A practical guide for enterprises. URL: https://addepto.com/blog/how-to-make-an-ai-model-a-practical-guide-for-enterprises/ [In English].
4. Mishra S., & Tripathi A. R. (2021). AI business model: An integrative business approach. Journal of Innovation and Entrepreneurship, 10(18). https://doi.org/10.1186/s13731-021-00157-5 [In English].
5. Ta P. A. (2025). How to create an AI model for your business. URL: https://smartdev.com/how-to-create-an-ai-model-for-your-business/ [In English].
6. Buiak L. (2024). Modeli pidtrymky pryiniattia rishen v upravlinni pidpryiemstvamy merezhevykh struktur: bezpekoznavchyi bazys [Models of decision-making support in the management of network-structured enterprises: a security-based foundation]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, 1. https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-326-10 [In Ukrainian].
7. Derba V. S. (2024). Shtuchnyi intelekt yak instrument vdoskonalennia kliuchovykh biznes-protsesiv pidpryiemstva [Artificial intelligence as a tool for improving key business processes of an enterprise]. *Zdobutky ekonomiky: perspektyvy ta innovatsii*, 8. https://doi.org/10.5281/zenodo.13284225 [In Ukrainian].
8. Doronina O., & Diadii V. (2025). Vykorystannia shtuchnoho intelektu u protsesi pryiniattia upravlinskykh rishen: ryzyky ta perevahy [Use of artificial intelligence in managerial decision-making: risks and advantages]. *Ekonomika i orhanizatsiia upravlinnia*, 1, 53–61. https://doi.org/10.31558/2307-2318.2024.3.6 [In Ukrainian].
9. Drynov D., Zahorodnikh V., & Zinchenko O. (2023). Zastosuvannia shtuchnoho intelektu u systemi upravlinnia pidpryiemstvom [Application of artificial intelligence in enterprise management systems]. *Ekonomichnyi prostir*, 188, 79–82. https://doi.org/10.32782/2224-6282/188-13 [In Ukrainian].
10. Pivniuk A.V. (2024). Vykorystannia shtuchnoho intelektu v suchasnii diialnosti pidpryiemstv [Use of artificial intelligence in modern business activities]. Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriia: Ekonomika i upravlinnia, 4, 70–74. https://doi.org/10.32782/2523-4803/74-4-12 [In Ukrainian].

UDC 004.4 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.39

R. S. SAVITSKYI
Postgraduate Student,
Senior Lecturer at the Department of Software Engineering
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID: 0000-0001-9804-3604

A. YU. MIANOVSKA
Master's Student at the Department of Software Engineering
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID: 0009-0002-9904-3002

INTEGRATING NLP LIBRARIES AND PRE-TRAINED MODELS FOR AUTOMATED TEXT COMPLEXITY ASSESSMENT

The rapid development of intelligent multi-agent systems has significantly influenced the field of Natural Language Processing (NLP), enabling more efficient and scalable text analysis methods. This study explores a modular approach to NLP, emphasising the integration of specialised libraries and models to enhance text processing capabilities. Modern NLP solutions streamline tasks like text complexity assessment by leveraging machine learning (ML) and deep learning techniques, particularly through pre-trained models and structured linguistic pipelines. Such integration allows for addressing not only syntactic and lexical aspects but also deeper semantic relationships within texts. The modular system proposed in this research allows for the seamless combination of various NLP components, ensuring adaptability to different analytical tasks. The study focuses on widely used NLP tools, including SpaCy for linguistic analysis and BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) for deep contextual understanding. The approach integrates traditional linguistic analysis with advanced neural network-based models to facilitate the assessment of text difficulty. The research presents a systematic approach to categorising texts of varying complexity, ranging from essential children's stories to advanced legal documents.

The research underscores the effectiveness of modular NLP systems in addressing the growing demand for automated text analysis. Combining structured linguistic features with deep-learning-based contextual embeddings enables accurate classification of text complexity, facilitating language learning and computational text processing applications. A key advantage of the modular approach is its flexibility and scalability, allowing researchers and developers to integrate customised NLP solutions for diverse applications. By adopting a modular approach, NLP continues to evolve, providing scalable and adaptable solutions for the ever-increasing challenges of text analysis.

Key words: *modular approach, natural language processing, text analysis, text complexity, text classification, pre-trained model.*

Р. С. САВІЦЬКИЙ
аспірант,
старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID: 0000-0001-9804-3604

А. Ю. М'ЯНОВСЬКА
студентка кафедри інженерії програмного забезпечення
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID: 0009-0002-9904-3002

ІНТЕГРАЦІЯ БІБЛІОТЕК NLP ТА ПОПЕРЕДНЬО НАВЧЕНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОЇ ОЦІНКИ СКЛАДНОСТІ ТЕКСТУ

Стрімкий розвиток інтелектуальних мультиагентних систем суттєво вплинув на сферу обробки природної мови (NLP), дозволяючи більш ефективні та масштабовані методи аналізу тексту. Це дослідження досліджує модульний підхід до NLP, наголошуючи на інтеграції спеціалізованих бібліотек і моделей для покращення можливостей обробки тексту. Сучасні рішення NLP спрощують такі завдання, як оцінка складності тексту, використовуючи методи машинного навчання (ML) і глибокого навчання, зокрема, за допомогою попередньо навчених моделей та структурованих лінгвістичних конвеєрів. Така інтеграція дозволяє враховувати не лише синтаксичні та лексичні аспекти, але й глибші семантичні зв'язки в текстах. Модульна система, запропонована в цьому дослідженні, дозволяє бездоганно поєднувати різні компоненти NLP, забезпечуючи адаптивність до різних аналітичних завдань. Дослідження зосереджено на широко використовуваних інструментах NLP включаючи SpaCy

для лінгвістичного аналізу та BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) для глибокого розуміння контексту. Підхід поєднує традиційний лінгвістичний аналіз із передовими моделями на основі нейронних мереж, щоб полегшити оцінку складності тексту. Дослідження представляє системний підхід до класифікації текстів різної складності, починаючи від простих дитячих історій і закінчуючи складними юридичними документами.

Дослідження підкреслює ефективність модульних систем NLP у вирішенні зростаючого попиту на автоматизований аналіз текстів. Поєднання структурованих лінгвістичних характеристик із контекстними вбудовуваннями, заснованими на глибокому навчанні, забезпечує точну класифікацію складності текстів, що сприяє їх використанню у вивченні мов та комп'ютерній обробці текстів. Ключовою перевагою модульного підходу є його гнучкість і масштабованість, що дозволяє дослідникам і розробникам інтегрувати індивідуальні рішення NLP для різних застосувань. Завдяки впровадженню модульного підходу NLP продовжує розвиватися, пропонуючи масштабовані та адаптивні рішення для дедалі складніших завдань аналізу тексту.

Ключові слова: *модульний підхід, обробка природної мови, аналіз тексту, складність тексту, класифікація тексту, попередньо навчена модель.*

Problem statement

In the contemporary world, the volume of textual information is rapidly growing, creating challenges for efficient and meaningful analysis. In domains such as education, business, and social sciences, the ability to process large amounts of unstructured textual data has become a critical task. The increasing fragmentation and inconsistency of data further complicate comprehension and interpretation.

Manual processing of such vast data sets often exceeds human capabilities, making automation essential. Technologies such as Artificial Intelligence (AI), Machine Learning (ML), and Natural Language Processing (NLP) offer powerful solutions for text processing, classification, key information extraction, and the generation of analytical conclusions. However, the growing diversity and complexity of digital content introduce new obstacles, such as the lack of modularity and adaptability in current NLP tools, which hinder scalability and reuse across diverse tasks.

There is a clear need for modular systems that simplify the development of NLP workflows, ensure interoperability, and adapt to various use cases such as sentiment analysis, text summarisation, and complexity assessment. The problem of automating the evaluation of text complexity is particularly relevant, as subjective human judgment is difficult to scale and standardise.

Analysis of the latest research and publications

With the exponential rise of AI and digital content, where the internet is rich with millions of texts and diverse content, Flayeh A. K. et al. (2022) investigated applying NLP techniques for analysing large volumes of text data. They sought to solve the problem of locating hidden information in enormous text databases using artificial intelligence methods [1].

Xipeng Q. et al. (2020) conducted a comprehensive survey on pre-trained models (PTMs) and their impact on advancing NLP, aiming to provide a practical guide for understanding, utilising, and improving PTMs in deep learning and neural networks [2].

Shikun K. et al. (2024) researched the robustness of the Latent Dirichlet Allocation (LDA) model, a widely used Bayesian algorithm for text analysis, by addressing its sensitivity to the choice of prior distributions. The authors demonstrated that the model's parameters are not fully identified. They developed two algorithms to quantify how changes in priors affect posterior means. The approach was applied to study the effects of increased transparency on U.S. monetary policy discussions, showcasing the importance of robust modelling in text analysis [3].

The research increasingly seeks to bridge qualitative and quantitative approaches; Parks L. and Peters W. (2022) explored integrating NLP techniques with qualitative methods. They created a mixed-methods text analysis workflow to address the challenge of balancing depth and breadth in analysing diverse text datasets. The method focuses on the iterative interaction between manual analysis and computational tools to gain deeper insights through interdisciplinary dialogue [4].

In the context of growing challenges in analysing unstructured text, Roldan-Baluis et al. (2022) conducted a systematic review to explore the impact of NLP techniques and ML algorithms on addressing societal issues. By analysing articles published in SCOPUS in 2021, they identified Term Frequency-Inverse Document Frequency (TF-IDF) as the most utilised NLP technique, Support Vector Machines (SVM) as the leading supervised learning algorithm, and Long Short-Term Memory (LSTM) as the predominant deep learning approach [5].

Benicio et al. (2022) developed a tool leveraging Text Mining and NLP techniques to transform unstructured free-text data into a structured format. They conducted a comparative analysisThey conducted a comparative analysis between data manually retrieved by healthcare professionals and data processed by their tool, with statistical evaluation using the Kruskal-Wallis test. Results demonstrate no significant difference between the manual and automated methods, showcasing the tool's effectiveness in facilitating accurate data retrieval from unstructured medical records [6].

Fate V. D. (2021) investigated how text analytics can help derive valuable insights from various types of textual data, such as support tickets, medical records, and product descriptions. The study outlines the difficulties of working with

unstructured data, as it lacks consistent formats or structures. Text analytics will provide a new dimension to knowledge management and many applications across the spectrum, for instance, from automatic systems to chatbots. The research emphasises the growing significance of text analytics regarding the challenges posed by modern data architectures [7].

Purpose of the article

The purpose of this article is to develop and demonstrate a modular system for automated text complexity analysis using advanced Natural Language Processing (NLP) technologies. Given the exponential growth of digital textual content and the limitations of manual processing, the proposed approach focuses on building scalable, flexible, and adaptable tools that support the structuring, classification, and interpretation of unstructured text data. The emphasis is placed on combining pre-trained models and modular components to enhance the automation and accuracy of text analysis workflows.

This study aims to:

1. Explore modularity as a design principle for developing flexible and reusable NLP-based systems.
2. Analyse the capabilities of existing NLP libraries in tasks such as text preprocessing, linguistic analysis, and feature extraction.
3. Assess the effectiveness of pre-trained models in preserving semantic context and supporting complex tasks like classification and semantic analysis.
4. Demonstrate how modular NLP components can be integrated into a unified framework to streamline development, ensure interoperability, and facilitate system scalability.

Presentation of the main material

With the rapid development of AI technologies, Natural Language Processing has become one of the most rapidly evolving branches of modern information technology. NLP enables computers to understand and interpret human language, either fully automatically or with some human intervention [8]. The field is multidisciplinary and closely related to computer science and linguistics. NLP employs various methods, ranging from sophisticated machine learning algorithms, notably deep learning, to more conventional rule-based approaches, enabling systems to perform tasks such as syntactic parsing, named entity recognition, and text summarization.

Computers achieving human-like proficiency in language processing would mark the advent of intelligent machines. This belief stems from the idea that language use is deeply tied to human cognitive abilities [9]. As researchers develop increasingly sophisticated models, the gap between human and machine language understanding narrows. Opportunities are unlocking innovation in education and other fields by empowering engines to respond to natural language effectively.

Conventionally, the text analysis process in NLP is divided into several stages. One of the key components is syntax, which defines how words are arranged to form grammatically correct sentences [8]. This stage ensures the structural integrity of language by considering grammatical rules and the relationships between words. Another crucial aspect is semantics, which focuses on how words and phrases convey meaning, often represented in NLP through vector semantics [9]. Finally, pragmatics examines meaning in context, determining how language is interpreted based on situational factors [8].

A straightforward text analysis method starts by looking at the syntactic structure of phrases to create a structured framework that may be used to interpret literal or semantic meaning. A pragmatic analysis step, which determines the text's or utterance's context-specific meaning, usually comes next. While syntax and semantics focus more on sentence-level specifics, pragmatic analysis frequently concentrates on discourse-level comprehension. The difference between them can occasionally make it challenging to comprehend how natural language processing works [10].

The tripartite division into syntax, semantics, and pragmatics is a preliminary framework for analysing the processing of natural language texts. In addition to the previously established stages, we can introduce two earlier phases to refine the process further. These are tokenisation, which involves breaking the surface text into smaller, manageable units, and lexical analysis, where individual words or tokens are identified and categorised based on linguistic properties [10]. These initial steps provide a foundation for more advanced analysis in NLP.

Defining fundamental units like characters, words, and sentences is essential in the textual analysis of digital natural language texts. However, the complexity of this task is compounded by the diversity of languages, writing systems, and document sources. Resolving these ambiguities is a core focus of NLP [10].

Each piece of collected text data should have a distinct identifier for easy reference. These pieces are called documents in text analytics, usually consisting of several characters. Multiple documents together form a document collection or corpus. The growth in corpus size and variety has driven the development of automated techniques for harvesting and preparing text for NLP tasks. Characters are grouped to create words or terms in a particular language, and these words are the central focus of our analysis [12].

The first step in any NLP pipeline is text preprocessing, which involves tokenisation, stemming and lemmatisation. Libraries streamline these tasks, allowing developers to focus on higher-level objectives rather than reinventing these basic operations. Text preprocessing ensures that the input data is clean, standardised, and ready for advanced NLP tasks. One main factor for text preprocessing is eliminating noise and redundant text information, for example, special characters,

stop words, and punctuation. The practice helps reduce the data's dimensionality and, at the same time, improves the efficiency of subsequent analysis.

The following example elucidates the primary purpose. The raw data is "Artificial intelligence and machine learning are transforming industries.» The processed sentence is ['artificial', 'intelligence', 'and', 'machine', 'learning', 'be', 'transform', 'industry'].

Text preprocessing takes raw text as input and produces cleaned tokens as output. Tokens are individual words or phrases that are counted based on word frequency and act as the key features for analysis. The flow of characters in a natural language text should be partitioned into distinct, meaningful tokens before any language processing can be performed. Perfect punctuation would make tokenisation straightforward, but real languages are imperfect.

The utilisation of data in machine learning (ML) models is a process proven to yield efficient outcomes and facilitate comprehension. The process encompasses a series of methodologies employed to transform, clean and develop raw text data into a format appropriate for tasks involving NLP or ML. The objective of text preprocessing is to enhance the quality and usability of text data for subsequent analysis or modelling.

Since NLP relies upon sophisticated computational skills, developers require optimal tools to use NLP approaches and algorithms to produce services that can manipulate natural languages. Developers can use ready-made tools that facilitate text preprocessing, allowing them to concentrate more on building robust ML models.

NLP libraries are indispensable for automating tasks since they offer practical algorithms and pre-made solutions. They help transform raw text into meaningful insights, handling tasks like text preparation and building models to analyse language interactions.

Due to its extensive library and frameworks, which allow developers to design sophisticated language-driven applications quickly, Python is one of the most popular languages for NLP [11]. Its ease of usage will enable developers to quickly test and adjust various strategies, making it perfect for ML tasks where experimentation and rapid prototyping are key. Advancements in NLP tools and libraries have greatly improved text analysis and language understanding, making complex linguistic tasks more accessible.

The growing demand for efficient and scalable NLP tools has led to the development of libraries that balance performance and ease of use. One such solution is SpaCy, a high-performance NLP library designed for real-world applications. SpaCy is designed to bridge the gap between industrial applications and academic research in NLP. Its speed, pre-trained features, and user-friendly design tackle common challenges in modern text analysis.

One of SpaCy's key strengths is its ability to provide high-performance NLP processing while maintaining ease of use. It offers an optimised tokenisation system that efficiently segments text into words or sentences, enabling streamlined analysis [9]. Unlike some earlier libraries, SpaCy includes robust support for stemming and lemmatisation, reducing words to their root forms while preserving contextual accuracy [10].

Another advantage of SpaCy is its built-in part-of-speech (POS) tagging, which helps identify grammatical roles within a sentence, supporting syntactic analysis and sentence structure comprehension [13]. Additionally, SpaCy enables parsing techniques that analyse sentence grammar in depth, facilitating detailed linguistic evaluation [8]. The library also excels in Named Entity Recognition (NER), leveraging pre-trained models to identify and categorise entities such as individuals, organisations, and locations [10]. This feature allows for more practical information extraction and data-driven decision-making. Furthermore, SpaCy employs advanced dependency parsing techniques to determine relationships between words in a sentence, enhancing grammatical understanding and semantic analysis [7].

SpaCy's modular pipeline architecture promotes customisation. Users can add their processing components to specialised tasks such as sentiment analysis or domain-specific preprocessing. This feature ensures that SpaCy is a standalone tool and part of a broader ML or NLP workflow.

NLP models have become central to many AI applications, helping businesses and researchers understand and generate human language. They are widely used for tasks such as automatic translation, chatbot interactions, and even content creation. Over the years, advancements in ML and neural networks have propelled the evolution of NLP models, leading to more accurate and efficient language understanding systems. A key breakthrough in this evolution has been the development of pre-trained models, eliminating the need to build and train models from scratch.

Deep learning models trained on large-scale datasets to perform specific NLP tasks are known as pre-trained models for NLP [11]. Language models are trained on immense amounts of data, enabling them to achieve accuracy that is sensitive to the context. One of the reasons deep learning has become so effective is its layered architecture, which mimics the hierarchical nature of language processing. The initial layers process raw text by transforming words into numerical representations, often using embeddings, while deeper layers analyse syntactic dependencies and semantic meaning. By leveraging multiple processing layers, models continuously refine their understanding of human language, improving contextual awareness [14].

Once trained, a pre-trained language model can be applied to various tasks, like answering questions or summarising content, without needing to start from scratch every time. This saves effort since they do not always require large amounts of labelled data or custom training for each new project.

Pre-trained language models provide a flexible and scalable way to handle NLP tasks. They can work across various formats like text, images, and audio, and their ability to adapt through fine-tuning or tailored prompts has significantly improved the field. Pre-trained models have become essential to modern NLP workflows, driving innovation and improving efficiency in applications such as translation tools and summarization systems. Their ability to generate high-quality translations and concise summaries with minimal human intervention has made them indispensable in automating language processing tasks [15].

NLP models are essential for text analysis because they offer efficient and accurate solutions for processing human language. Pre-trained models, in particular, are highly effective as they come pre-trained on extensive datasets, saving time and computational resources compared to building models from scratch. One key advantage of using models is their adaptability; they can be fine-tuned for specific analytic tasks.

BERT has emerged as a groundbreaking model in the field of NLP. Developed by Google in 2018, BERT introduced a paradigm shift by enabling models to deeply understand the context of words in a sentence by processing them bi-directionally. Unlike traditional NLP models that read text in one direction, either left-to-right or right-to-left, BERT considers the entire context, making it robust for understanding complex linguistic nuances [9].

The model is trained on a large corpus using unsupervised learning tasks, such as Masked Language Modelling (MLM) and Next Sentence Prediction (NSP). MLM helps BERT predict masked words in a sentence, while NSP trains it to understand relationships between sentence pairs. After pre-training, BERT is fine-tuned on explicit tasks like text classification or question answering using smaller, labelled datasets [9]. BERT's remarkable success stems from training on an extensive dataset comprising 3.3 billion words. The dataset includes 2.5 billion words from Wikipedia and 800 million from the Google BooksCorpus. Vast sources of information have significantly enhanced BERT's deep comprehension of the English language.

In analysing language difficulty, BERT has been shown to model sentence complexity by identifying lexical richness, grammatical structures, and inter-sentence dependencies. BERT is an excellent tool for tasks such as evaluating educational materials, grading essays and adapting content for varying reading levels [15]. In evaluating the complexity of English texts, the BERT model has demonstrated its capacity to analyse patterns in sentence construction and vocabulary usage to generate insights about readability. It can also adapt to niche domains when combined with other models or datasets, enhancing its reliability and interpretability.

BERT's role in NLP extends beyond mere complexity evaluation. As part of foundational NLP methodologies, it serves as a blueprint for modern models that integrate nuanced textual understanding with large-scale applications, offering immense potential for research and industry.

The modular approach to text complexity analysis leverages the synergy between advanced NLP models and libraries. It decomposes the task into independent modules – each addressing a specific aspect of text complexity – allowing for flexibility, scalability, and precise customisation. The proposed modular system combines SpaCy for traditional NLP preprocessing and feature extraction with BERT for contextual understanding.

SpaCy is a fast and flexible tool for preparing text for NLP tasks. Some of its key features include POS identifying distributions, building dependency trees, and analysing sentence structures. These capabilities create a structured linguistic representation of the text, ensuring that subsequent modules can effectively perform deeper contextual analysis and more advanced NLP tasks. By segmenting the text into manageable components, SpaCy ensures that other modules can work with well-organised data. One standout feature of SpaCy is its ability to integrate with transformer models like BERT through the spacy-transformers module, combining traditional linguistic analysis with modern contextual embeddings.

In a modular system, BERT takes on two primary roles. Firstly, it generates detailed representations of words and sentences by analysing context, offering a deep understanding of linguistic features. Secondly, it can be trained on datasets that align with CEFR levels, from A1 to C2. This additional training allows BERT to categorise text complexity with high effectiveness, aligning its assessments with widely recognised language proficiency standards. BERT's bidirectional approach to understanding context makes it particularly good at analysing complex sentence patterns. Its multilingual support is also suitable for comparing texts in different languages or working with translations.

Determining text complexity is critical in language learning and education. Combining SpaCy with BERT provides a robust framework for classifying text based on CEFR levels. By leveraging pre-trained embeddings and fine-tuning them on annotated datasets, texts can be classified based on syntactic, lexical, and semantic features.

The modularity of the NLP-based text classification system lies in the seamless integration of SpaCy's preprocessing pipeline with BERT's contextual embeddings. Preprocessed linguistic features from SpaCy are combined with BERT embeddings to form a comprehensive feature set. These features are then used in a downstream classifier to assign CEFR levels to input texts. SpaCy and BERT collaborate to classify the complexity of three distinct text types – children's stories, exam passages, and legal documents – into appropriate CEFR levels.

Children's stories often feature short, simple sentences, basic vocabulary, and a repetitive structure that reinforces principal concepts for beginner readers. SpaCy's syntactic parsing reveals that declarative phrases with few dependent clauses are more common. POS tagging identifies nouns, verbs, and adjectives characteristic of A1-level texts.

Furthermore, SpaCy computes lexical density and sentence length, confirming that they match beginner-level proficiency. BERT captures the semantic simplicity of children's stories by embedding their contextual patterns. For example, repetitive phrases are analysed to detect the straightforward semantic relationships and literal expressions indicative of early language acquisition stages. BERT excels at distinguishing A1 texts by recognising these characteristic patterns.

Exam passages combine a variety of syntactic patterns with a moderate amount of lexical variation. SpaCy's dependency parsing uncovers compound sentences and intermediate-level grammatical constructions, while its POS tagging reveals balanced distributions of academic nouns, verbs, and connectors. Additionally, SpaCy calculates lexical sophistication metrics, identifying less frequent but general-use terms. BERT evaluates the semantic and contextual properties of exam passages. By analysing sentence embeddings, it identifies the academic tone and multi-word expressions. Contextual understanding allows BERT to categorise texts at B1-level, reflecting intermediate proficiency requirements.

Legal documents exhibit high levels of syntactic complexity, formal register, and specialised terminology. SpaCy's syntactic parsing identifies nested clauses, conditional statements, and other markers of complex syntax. Its vocabulary analysis flags rare and domain-specific terms, while text statistics demonstrate above-average sentence length and lexical density. These characteristics strongly correlate with C2-level texts. BERT has been developed to address the semantic complexities of legal texts by embedding the relationships between abstract phrases and technical terms. For example, BERT can capture some terms' formal tone and intent since they are contextualised inside the legal framework. By leveraging embeddings from optimised legal datasets, BERT accurately classifies texts to C2-level.

Combining SpaCy's ability to analyse linguistic structure with BERT's contextual understanding creates a system well-suited for categorising texts by CEFR levels. It addresses both the computational and linguistic challenges of text complexity. Its adaptable design ensures reliable performance with different text types and languages, conferring significant utility in language learning and research domains.

Table 1

Comparative table of responsibilities and CEFR level determining

Type text	SpaCy identifies	BERT identifies	CEFR level
Children's story	Simple sentences, basic vocabulary, present tense	Semantic simplicity, repetitive patterns	A1
Exam passage	Academic vocabulary, moderate syntactic complexity	Contextual usage of academic terms, intermediate tone	B1
Legal Document	Long sentences, formal register, domain-specific terms	Semantic density, legal jargon, abstract structures	C2

Conclusion

Implementing the modular approach to NLP provides a powerful way to handle the increasing complexity of textual data. The modularity makes implementing NLP systems easier, encourages broader adoption, and drives innovation in academic applications. Integrating SpaCy for text preprocessing and BERT for contextual understanding enables a more versatile approach to various text analysis problems.

The study emphasises the merits of employing pre-trained models, which attain elevated levels of accuracy in complex tasks such as text categorisation and semantic analysis. Through the systematic combination of SpaCy's traditional linguistic features and BERT's contextual embeddings, the proposed modular framework demonstrates robustness in classifying texts based on their complexity and aligning them with established benchmarks like CEFR levels.

This study, furthermore, fosters interdisciplinary cooperation by bridging the gap between theoretical developments in NLP and real-world applications. Incorporating modularity improves the scalability of NLP systems while also speeding up development processes. The thorough approach described here highlights how modularity facilitates the use of state-of-the-art technology and makes text analysis workflows accurate and effective.

Future research could build upon this modular architecture by adding domain-specific features, improving multilingual capabilities, and investigating real-time applications in dynamic contexts. By further honing and expanding the modular approach, NLP can develop further to satisfy the ever-increasing needs of processing and comprehending textual material in a world that is becoming increasingly information-driven. This work provides a foundation for such advancements, fostering innovation and accessibility in modern language processing.

Bibliography

1. Flayeh A. K., Hamodi Y. I., Zaki N. D. Text analysis based on natural language processing (NLP) // Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Engineering and Smart Technology (AEST). 2022. URL: https://doi.org/10.1109/AEST55805.2022.10413039 (date of access: 15.06.2025).

2. Qiu X., Sun T., Xu Y., Shao Y., Dai N., Huang X. Pre-trained models for natural language processing: A survey // Science China Technological Sciences. 2020. Vol. 63, No. 10. P. 1872–1897. DOI: https://doi.org/10.1007/s11431-020-1647-3 (date of access: 15.06.2025).

3. Shikun K., Montiel Olea J. L., Nesbit J. Robust machine learning algorithms for text analysis // Quantitative Economics. 2024. Vol. 15, No. 4. P. 939–970. DOI: https://doi.org/10.3982/QE1825 (date of access: 15.06.2025).

4. Parks L., Peters W. Natural language processing in mixed-methods text analysis: A workflow approach // International Journal of Social Research Methodology. 2022. Vol. 26, No. 1. P. 1–13. DOI: https://doi.org/10.1080/13645579.2021.2018905 (date of access: 15.06.2025).

5. Roldan-Baluis W. L., Zapata N. A., Mañaccasa Vásquez M. S. The effect of natural language processing on the analysis of unstructured text: A systematic review // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2022. Vol. 13, No. 5. P. 43–51. DOI: https://doi.org/10.14569/IJACSA.2022.0130507 (date of access: 15.06.2025).

6. Benício D. H. P., Júnior J. C. X., Paiva K. R. S., de Camargo J. D. A. S. Applying text mining and natural language processing to electronic medical records for extracting and transforming texts into structured data // Research, Society and Development. 2022. Vol. 11, No. 6. P. e37711629184. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29184 (date of access: 15.06.2025).

7. Fate V. D., Deshmukh A. B., Watane H. N. Text analytics: An approach to artificial intelligence // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. 2021. Vol. 8, No. 7. P. f104–f111. URL: https://www.jetir.org/papers/JETIR2107644.pdf (date of access: 15.06.2025).

8. Copestake A. Natural Language Processing: Lectures. Cambridge, U.K.: University of Cambridge, Computer Laboratory, 2004. URL: https://www.cl.cam.ac.uk/teaching/2002/NatLangProc/revised.pdf (date of access: 15.06.2025).

9. Jurafsky D., Martin J. H. Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing, Computational Linguistics, and Speech Recognition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2008. URL: https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3/ed3book.pdf (date of access: 15.06.2025).

10. Indurkhya N., Damerau F. J. Handbook of Natural Language Processing. 2nd ed. Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC, 2010. DOI: https://doi.org/10.1201/9781420085938 (date of access: 15.06.2025).

11. Montesinos López O. A., Montesinos López A., Crossa J. Fundamentals of artificial neural networks and deep learning // In: Multivariate Statistical Machine Learning Methods for Genomic Prediction. Springer, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-89010-0_10 (date of access: 15.06.2025).

12. Pawłowski A., Walkowiak T. NLP for digital humanities: Processing chronological text corpora // Proceedings of the 4th International Conference on Natural Language Processing for Digital Humanities. 2024. P. 105–112. DOI: https://doi.org/10.18653/v1/2024.nlp4dh-1.10 (date of access: 15.06.2025).

13. Partalidou E., Spyromitros-Xioufis E., Doropoulos S., Vologiannidis S., Diamantaras K. Design and implementation of an open source Greek POS tagger and entity recogniser using spaCy // arXiv Preprint. 2019. DOI: https://doi.org/10.1145/3350546.3352543 (date of access: 15.06.2025).

14. Camacho-Collados J., Täckström O. Embeddings in natural language processing // Proceedings of the 28th International Conference on Computational Linguistics: Tutorial Abstracts. 2020. P. 10–15. DOI: https://doi.org/10.18653/v1/2020.coling-tutorials.2 (date of access: 15.06.2025).

15. Paaß G., Giesselbach S. Foundation Models for Natural Language Processing: Pre-trained Language Models Integrating Media. Cham, Switzerland: Springer, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-23190-2 (date of access: 15.06.2025).

References

1. Flayeh, A. K., Hamodi, Y. I., & Zaki, N. D. (2022). Text analysis based on natural language processing (NLP). Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Engineering and Smart Technology (AEST). https://doi.org/10.1109/AEST55805.2022.10413039

2. Qiu, X., Sun, T., Xu, Y., Shao, Y., Dai, N., & Huang, X. (2020). Pre-trained models for natural language processing: A survey. Science China Technological Sciences, 63(10), 1872–1897. https://doi.org/10.1007/s11431-020-1647-3

3. Shikun, K., Montiel Olea, J. L., & Nesbit, J. (2024). Robust machine learning algorithms for text analysis. *Quantitative Economics*, 15(4), 939–970. https://doi.org/10.3982/QE1825

4. Parks, L., & Peters, W. (2022). Natural language processing in mixed-methods text analysis: A workflow approach. *International Journal of Social Research Methodology*, 26(1), 1–13. https://doi.org/10.1080/13645579.2021.2018905

5. Roldan-Baluis, W. L., Zapata, N. A., & Mañaccasa Vásquez, M. S. (2022). The effect of natural language processing on the analysis of unstructured text: A systematic review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(5), 43–51. https://doi.org/10.14569/IJACSA.2022.0130507

6. Benício, D. H. P., Júnior, J. C. X., Paiva, K. R. S., & de Camargo, J.1 D. A. S. (2022). Applying text mining and natural language processing to electronic medical records for extracting and transforming texts into structured data. *Research, Society and Development*, 11(6), e37711629184. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29184

7. Fate, V. D., Deshmukh, A. B., & Watane, H. N. (2021). Text analytics: An approach to artificial intelligence. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 8(7), f104–f111. https://www.jetir.org/papers/JETIR2107644.pdf

8. Copestake, A. (2004). *Natural Language Processing: Lectures*. Cambridge, U.K.: University of Cambridge, Computer Laboratory. https://www.cl.cam.ac.uk/teaching/2002/NatLangProc/revised.pdf

9. Jurafsky, D., & Martin, J. H. (2008). *Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing, Computational Linguistics, and Speech Recognition*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3/ed3book.pdf

10. Indurkhya, N., & Damerau, F. J. (2010). *Handbook of Natural Language Processing* (2nd ed.). Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC. https://doi.org/10.1201/9781420085938

11. Montesinos López, O. A., Montesinos López, A., & Crossa, J. (2022). Fundamentals of artificial neural networks and deep learning. In *Multivariate Statistical Machine Learning Methods for Genomic Prediction*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89010-0_10

12. Pawłowski, A., & Walkowiak, T. (2024). NLP for digital humanities: Processing chronological text corpora. *Proceedings of the 4th International Conference on Natural Language Processing for Digital Humanities*, 105–112. https://doi.org/10.18653/v1/2024.nlp4dh-1.10

13. Partalidou, E., Spyromitros-Xioufis, E., Doropoulos, S., Vologiannidis, S., & Diamantaras, K. (2019). Design and implementation of an open source Greek POS tagger and entity recogniser using spaCy. *arXiv Preprint*. https://doi.org/10.1145/3350546.3352543

14. Camacho-Collados, J., & Täckström, O. (2020). Embeddings in natural language processing. *Proceedings of the 28th International Conference on Computational Linguistics: Tutorial Abstracts*, 10–15. https://doi.org/10.18653/v1/2020.coling-tutorials.2

15. Paaß, G., & Giesselbach, S. (2023). *Foundation Models for Natural Language Processing: Pre-trained Language Models Integrating Media*. Cham, Switzerland: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23190-2

УДК 004.43 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.40

Д. О. САПОЖНИК
аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID: 0000-0003-1357-2422

ПРОЦЕС ПЕРЕТВОРЕННЯ ВИСОКОРІВНЕВИХ КВАНТОВИХ ВЕНТИЛІВ У БАЗОВІ ДЛЯ ВИКОНАННЯ НА РЕАЛЬНОМУ КВАНТОВОМУ КОМП'ЮТЕРІ

У статті здійснено системне дослідження процесу транспіляції квантових алгоритмів, що є обов'язковим етапом підготовки до виконання програм на реальних квантових пристроях. Розкрито сутність поняття базових вентилів (basis gates) як елементарного набору унітарних операцій, які підтримуються конкретним апаратним забезпеченням. Обґрунтовано, чому високорівневі квантові вентилі (такі як Hadamard, Toffoli, Fredkin) не можуть бути реалізовані безпосередньо на більшості сучасних квантових процесорів через апаратні обмеження та особливості архітектури, включно з топологією зв'язків між кубітами. У якості прикладу розглянуто платформу IBM Quantum, де базовий набір для надпровідникових процесорів типу Eagle включає вентилі RZ, SX, X та двокубітну операцію ECR (Echoed Cross Resonance). Проведено поетапний аналіз процесу транспіляції у середовищі Qiskit, що включає уніфікацію схеми, розклад високорівневих вентилів у базові, перетворення логічних кубітів на фізичні, врахування карти з'єднань, вставлення SWAP-вентилів, а також оптимізацію схеми з метою зменшення її глибини та кількості операцій. Пояснено, як транспілятор автоматично адаптує логічну квантову схему до обмежень реального пристрою за допомогою вбудованих бібліотек розкладу вентилів та оптимізаційних проходів (зокрема, алгоритму SABRE). Наведено приклад транспіляції схеми з вентилями H, CX та T, де показано перехід до повністю сумісної з апаратним рівнем реалізації. Визначено переваги використання різних рівнів оптимізації (0–3) транспілятора Qiskit, розглянуто вплив оптимізації на точність результатів та стійкість до шуму. Особливу увагу приділено питанням ефективного програмування з урахуванням апаратних обмежень: зменшенню кількості багатокубітних вентилів, раціональному використанню допоміжних кубітів, обмеженню використання бар'єрів та доцільності ручного коригування відповідностей кубітів у схемі.

Ключові слова: *квантове програмування, квантові технології, транспіляція, квантові вентилі, базові вентилі, Qiskit, IBM Quantum, квантова компіляція, оптимізація квантових схем.*

D. O. SAPOZHNYK
Postgraduate Student at the Department of Software Engineering
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID: 0000-0003-1357-2422

THE PROCESS OF TRANSFORMING HIGH-LEVEL QUANTUM GATES INTO BASIS GATES FOR EXECUTION ON A REAL QUANTUM COMPUTER

The article provides a systematic study of the process of transpilation of quantum algorithms, which is a mandatory stage of preparation for the execution of programs on real quantum devices. The essence of the concept of basic gates is disclosed as an elementary set of unitary operations that are supported by specific hardware. It is substantiated why high-level quantum gates (such as Hadamard, Toffoli, Fredkin) cannot be implemented directly on most modern quantum processors due to hardware limitations and architectural features, including the topology of connections between qubits. As an example, the IBM Quantum platform is considered, where the basic set for superconducting processors of the Eagle type includes RZ, SX, X gates and a two-qubit ECR (Echoed Cross Resonance) operation. A step-by-step analysis of the process of transpilation in the Qiskit environment has been carried out, which includes unification of the circuit, decomposition of high-level valves into basic ones, transformation of logical qubits into physical ones, consideration of the connection map, insertion of SWAP-valves, as well as optimization of the circuit to reduce its depth and the number of operations. It explains how the transpiler automatically adapts the logic quantum circuit to the limitations of the real device using built-in libraries of valve schedules and optimization passes (in particular, the SABRE algorithm). An example of transpilation of the circuit with valves H, CX and T is given, which shows the transition to a fully hardware-compatible implementation. The advantages of using different levels of optimization (0–3) of the Qiskit transpiler are determined, the influence of optimization on the accuracy of results and noise resistance is considered. Particular attention is paid to the issues of effective programming, considering hardware limitations: reducing the number of multi-qubit valves, rational use of auxiliary qubits, limiting the use of barriers and the feasibility of manually adjusting the correspondences of qubits in the scheme.

Key words: *quantum programming, quantum technologies, transpilation, quantum gates, basis gates, Qiskit, IBM Quantum, quantum compilation, quantum circuit optimization.*

Постановка проблеми

Базові вентилі апаратного забезпечення – це набір квантових логічних операцій, які фізично реалізовані на конкретному квантовому процесорі [1]. Інакше кажучи, ці вентилі являють собою базові квантові операції, реалізація яких забезпечується безпосередньо на фізичному (апаратному) рівні квантових обчислювальних систем. Кожен виробник квантових комп'ютерів має свій набір базових вентилів залежно від технології: наприклад, в іонних пастках можуть бути базовими глобальні Mølmer–Sørensen вентилі [2], а в надпровідникових кубітах IBM – інший набір. IBM Quantum для різних поколінь процесорів визначає власні базові вентилі, для процесорів сімейства Eagle (надпровідниковий чип IBM на 127 кубітів) базовими є однокубітні вентилі *RZ* (поворот навколо осі *Z*), *SX* (квадратний корінь із *X*), *X* (Паулі-X), а також двокубітний вентиль *ECR* (*echoed cross-resonance*) [3]. У процесорах сімейства Falcon базовим двокубітним вентилем є *CX* (контрольований *X*) [4]. Всі складніші операції на реальному квантовому пристрої повинні бути розкладені на послідовність цих базових вентилів перед виконанням.

За допомогою високорівневих вентилів у квантових алгоритмах проводяться дії над абстрактними логічними операціями, незалежними від апаратури, наприклад: вентиль Адамара (Hadamard), Toffoli (вентиль з двома контрольними кубітами), *Fredkin* (контрольований обмін), фази *T* та *S* та інші. Реальні квантові комп'ютери фізично не здатні виконувати більшість таких вентилів напряму, оскільки апаратно обмежені до свого базового набору [5]. Причини цього пов'язані з особливостями фізичної реалізації кубітів та їх взаємодій. Наприклад, у надпровідникових квантових процесорах керування здійснюється за допомогою мікрохвильових імпульсів, що дозволяє реалізувати лише певні типи одно- та двокубітних унітарних операцій (обертання навколо визначених осей і спеціально відкалібровані двокубітні взаємодії). Інші типи вентилів мають бути синтезовані на основі зазначених доступних базових операцій.

Крім того, існують архітектурні обмеження, пов'язані з тим, що безпосередня взаємодія можлива не між усіма парами кубітів на квантовому чипі. Внаслідок цього складні багатокубітні операції (наприклад, трикубітні вентилі *Toffoli* або *Fredkin*), а також двокубітні операції типу *CNOT* між кубітами, що фізично знаходяться на значній відстані, необхідно розкладати на серію елементарних вентилів, сумісних із топологією конкретного квантового пристрою. Наприклад, вентиль *Toffoli* не є фундаментальним для більшості сучасних квантових процесорів, і для його реалізації зазвичай використовують комбінацію кількох двокубітних *CNOT*-операцій і однокубітних унітарних поворотів. Аналогічним чином, вентиль *Fredkin* [6] (контрольований *SWAP*) також вимагає розкладання на базові двокубітні операції. Відповідно, компіляція квантових програм до набору фізично реалізованих елементарних вентилів є обов'язковим етапом для виконання алгоритму на конкретному апаратному забезпеченні, оскільки без такого перетворення високорівневі описи алгоритмів не можуть бути безпосередньо втілені у фізичних квантових процесорах. Саме тому процес приведення логічних квантових вентилів до базових важливий для розуміння та роботи з квантовими комп'ютерами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Процес перетворення схеми із довільних вентилів у еквівалентну схему з базових вентилів називається **транспіляцією** [5]. Транспілятор приймає на вхід квантовий ланцюг (сукупність вентилів над кубітами) і проходить кілька етапів (рисунок 1), кожен з яких адаптує ланцюг до вимог цільового квантового пристрою.

Крок 1 – уніфікація опису. Всі нестандартні та складні операції у схемі уніфікуються, якщо користувач визначив вентиль не заявлений у наборі високорівневих квантових гейтів транспілятор замінить його еквівалентною підмножиною стандартних вентилів (наприклад, у Qiskit – це універсальний набір *U3*, *CX* тощо) [5]. Так схема приводиться до базового набору «віртуальної машини» – проміжного універсального представлення.

Крок 2 – розклад на базові вентилі. Кожен високорівневий вентиль зі списку, що не підтримується пристроєм, замінюється послідовністю доступних вентилів [1]. Наприклад, вентиль Адамара *H* буде розкладено на комбінацію поворотів *RZ* та *SX* (оскільки ні *H*, ні *Y* не є базовими на чипах IBM Eagle), а вентиль T (фазовий зсув на *pi*/4) – еквівалентний просто *RZ*(*pi*/4) і може напряму виконуватися через віртуальний *Z*-поворот [3]. Багатокубітні вентилі розкладаються рекурсивно: наприклад, Toffoli спершу розкладається на елементи з CNOT та одно кубітних *T*, *H* та *T-dagger* (цей стандартний розклад займає 8 елементарних вентилів, з них 6 – це *CNOT*). Кожен двокубітний *CNOT* своєю чергою може бути реалізований через базову двокубітну взаємодію цільового пристрою (для IBM Eagle це ECR). Таким чином, після цього кроку всі вентилі зі схеми належать до дозволеного набору цільового обладнання [7].

Крок 3 – Врахування зв'язностей. Транспілятор перевіряє, які кубіти у пристрої залучені та чи потрібна перестановка кубітів для врахування геометрії з'єднань. Якщо у схемі є двокубітний вентиль між кубітами, які фізично не з'єднані, алгоритм вставляє додаткові вентилі *SWAP* (розмін кубітів місцями) для маршрутизації взаємодії через сусідні зв'язки мережі кубітів [3, 5]. Транспілятор Qiskit використовує для цього спеціальні алгоритми, зокрема *heuristic Sabre*, які намагаються мінімізувати кількість *SWAP*, адже кожен *SWAP* додає три *CNOT* і збільшує глибину схеми [8]. На цьому етапі також відбувається вибір розкладки кубітів – тобто призначення логічних кубітів програми до конкретних фізичних кубітів процесора для оптимальної реалізації.

Крок 4 – Оптимізація схем. Отримавши еквівалентну схему з допустимих вентилів, транспілятор застосовує серію оптимізаційних проходів. На цьому етапі аналізуються послідовності вентилів з метою спростити або



Рис. 1. Схема транспіляції

скоротити їх. Наприклад, послідовність із *X* за яким слідує ще один *X* на тому ж кубіті еквівалентна тотожності та обидва вентилі можуть бути видалені. Так само *T* і *T-dagger* (обернені) поруч дають нульовий зсув фази й скорочуються. Транспілятор знаходить такі пари інверсних операцій і взаємопоглинаючі послідовності та видаляє їх [5]. Окрім вилучення, суміжні однокубітні повороти об'єднуються в один еквівалентний поворот, щоб не витрачати зайві базові вентилі [5]. Аналізуючи перестановку вентилів, можна іноді змінити їх порядок, щоб більше сусідніх операцій скоротились. Такі логічні оптимізації зменшують загальну кількість вентилів і глибину квантового ланцюга. На глибину також впливають вставлені *SWAP*: транспілятор намагається за можливості їх теж скоротити або переставити ближче до кінця, якщо ті не впливають на результати вимірювань.

Крок 5 – Формування вихідної програми. Після всіх перетворень отриманий квантовий ланцюг складається виключно з вентилів, які підтримує цільовий квантовий процесор, і враховує його топологію з'єднань [7]. Цей ланцюг можна виконати на реальному пристрої (або еквівалентно на емуляторі з відповідною шумовою моделлю). Зазвичай транспілятор повертає програму у вигляді OpenQASM-коду або об'єкта QuantumCircuit, готового до запуску.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є формалізація та систематизація процесу перетворення високорівневих квантових вентилів у базові вентилі для забезпечення сумісності квантових алгоритмів із фізичними обмеженнями сучасних квантових обчислювальних платформ.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розглянемо простий квантовий ланцюг із двох кубітів, на рисунку 2 можна побачити, що на кубіт *q0* застосовується вентиль Адамара *H* (високорівнева однокубітна операція, яка не є базовою для IBM Eagle), між *q0* (контроль) і *q1* (ціль) застосовано вентиль *CNOT*, а на кубіт *q0* в кінці ставиться вентиль *T* (фазове зміщення на *pi*/4).

```
1   from qiskit import QuantumCircuit, transpile
2
3   # Створення квантового ланцюга з 2 кубітів
4   qc = QuantumCircuit(2)
5   qc.h(0)        # вентиль Адамара на кубіті 0
6   qc.cx(0, 1)    # CNOT з контролем 0 і ціллю 1
7   qc.t(0)        # T-вентиль на кубіті 0
8   print("Оригінальний ланцюг:")
9   print(qc)
```

Рис. 2. Двокубітний квантовий ланцюг з використанням Qiskit

Функція print, у свою чергу, покаже схему з високорівневими вентилями, яку можна побачити на рисунку 3.

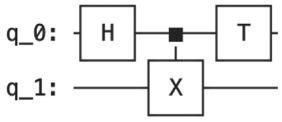


Рис. 3. Двокубітна квантова схема

Використавши функцію *transpile* з бібліотеки Qiskit можна виконати траспіляцію (рисунок 4) під конкретний квантовий комп'ютер, вказавши при цьому базові гейти ECR, RZ, SX та X [9].

```
transpiled_qc = transpile(
    qc, basis_gates=['rz', 'sx', 'x', 'ecr'])
print("Транспільований ланцюг:")
print(transpiled_qc)
```

Рис. 4. Виклик функції транспіляції

Після транспіляції була отримана еквівалентна схема, яка складається лише з базисних вентилів (рисунок 5) для квантового чіпа IBM Eagle r3[9].

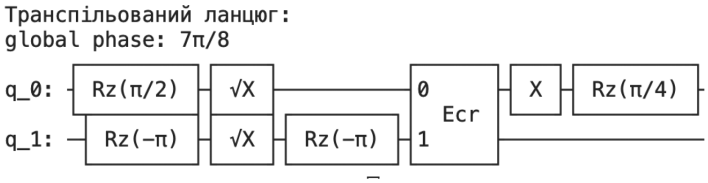


Рис. 5. Транспільований квантовий ланцюг

У транспільованій квантовій схемі вентиль *H* на кубіті *q*0 замінився на послідовність з повороту *RZ*(π/2) та *SX* (це одна з реалізацій *H* у базисі *RZ*, *SX*). Вентиль *T*, у свою чергу, став просто *RZ*(π/4) на кубіті *q*0, оскільки фазовий зсув це поворот навколо осі *Z*. Квантовий гейт *CNOT* між *q*0 і *q*1 у послідовностях дій: спочатку на контрольному кубіті *q*0 виконується фазовий поворот *RZ*(−π/2); одночасно на цільовому кубіті *q*1 виконуються послідовно три операції: *RZ*(−π), потім SX (квадратний корінь із *X*), і ще раз *RZ*(−π); застосовується базовий двокубітний вентиль ECR, після якого слідує вентиль X на контрольному кубіті *q*0, що завершує реалізацію вентиля *CNOT* [3].

В результаті отримано повністю сумісну з апаратними можливостями IBM Eagle схему транспіляції CNOT. На практиці Qiskit може генерувати варіації цієї схеми, які відрізняються порядком або фазовими зсувами, але склад використовуваних вентилів завжди залишається в межах базового набору [7].

Процес транспіляції квантових схем, описаний вище, реалізується за допомогою спеціалізованих компіляторів. В екосистемі IBM Quantum цю функцію виконує модульний компонент Qiskit Transpiler, що включає стандартні правила декомпозиції вентилів та набір алгоритмічних оптимізаційних проходів [10].

За замовчуванням транспілятором автоматично вибирається послідовність цих проходів, від початкового розміщення кубітів до скорочення квантової схеми, залежно від вибраного рівня оптимізації. Серед ключових компонентів транспілятора виділяються такі: бібліотека вентилів, облік топології пристрою та рівні оптимізації (рисунок 6).

Бібліотека вентилів транспілятора. Високорівневі вентилі розкладаються на базові за допомогою як готових схем (наприклад, Toffoli через CNOT і TTT-вентилі), так і за допомогою чисельних методів синтезу унітарних матриць. Для складних багатокубітних блоків на високих рівнях оптимізації застосовується алгоритм Картана (KAK), що мінімізує кількість двокубітних операцій [10].

Облік топології пристрою. Під час транспіляції може бути задана карта з'єднань (coupling_map) або обрано цільовий backend, з якого зчитується необхідна топологія та доступні базові вентилі. Для ефективного розміщення та маршрутизації використовується низка алгоритмів, серед яких за замовчуванням на високих рівнях оптимізації застосовується алгоритм *SABRE*. Останній стохастично визначає оптимальне розташування кубітів та мінімізує кількість вставлених *SWAP*-вентилів [10].

Рівні оптимізації. Транспілятором Qiskit підтримується параметр optimization_level (від 0 до 3), що визначає рівень зусиль, які докладаються до оптимізації. На нульовому рівні виконується лише базовий розклад вентилів без оптимізації. Перший та другий рівні здійснюють поступову оптимізацію схеми, включаючи скорочення послідовностей та застосування комутаційних правил. Третій рівень забезпечує найбільш агресивні оптимізації,



Рис. 6. Ключові компоненти транспілятора

включаючи повторну синтезацію підланцюгів та переміщення вимірювань для мінімізації SWAP-вентилів, зменшуючи глибину та кількість вентилів у схемі, хоча й вимагає більшого часу на компіляцію [10].

Висновки

Транспіляція високорівневих квантових схем у послідовності базових вентилів розглядається як обов'язковий етап підготовки квантових програм до виконання на реальних пристроях. Для досягнення максимальної ефективності обчислень має бути враховано набір базових вентилів, підтримуваних обраним квантовим процесором, а також його топологічні обмеження. З цією метою надається доступ до документації бекендів, у якій вказуються відповідні архітектурні характеристики. На основі цієї інформації може бути оцінено, наскільки ресурсомістким буде транспільований варіант вихідної схеми, особливо у випадках, коли в алгоритмі присутні вентилі, не реалізовані апаратно (наприклад, *Toffoli* або багатоконтрольовані вентилі).

Алгоритми мають бути спроєктовані з урахуванням потенційного розкладу, що дозволяє зменшити кількість багатокубітних операцій, які є найбільш чутливими до шумів. Доцільним вважається використання еквівалентних, але менш складних за реалізацією логічних конструкцій, а також залучення допоміжних кубітів для зменшення складності багатоконтрольованих вентилів. При цьому має бути забезпечена попередня оцінка впливу таких перетворень на загальну глибину та точність схеми.

Хоча сучасними транспіляторами, такими як Qiskit або Cirq, забезпечується високий рівень автоматизації, рекомендується здійснювати аналіз отриманої схеми. Зокрема, надмірна кількість *SWAP*-вентилів або значна глибина ланцюга можуть свідчити про необхідність перегляду розміщення кубітів або самої логіки алгоритму. В окремих випадках оптимізація може бути підвищена шляхом ручної перестановки логічних кубітів або модифікації вихідної схеми.

Застосування бар'єрів має бути обмеженим до тих випадків, коли це виправдано логікою обчислень, оскільки надмірна їх кількість може перешкоджати оптимізації, яку виконує транспілятор. Для досягнення оптимального співвідношення між швидкістю транспіляції та якістю отриманої схеми рекомендується тестування кількох рівнів оптимізації. У багатьох випадках третій рівень забезпечує значне зменшення кількості вентилів та глибини схеми, що позитивно впливає на точність обчислень.

Розуміння механізмів, за допомогою яких високорівневі вентилі транслюються у низькорівневі базові операції, дозволяє здійснювати більш обґрунтоване програмування квантових алгоритмів. Попри постійний розвиток квантової апаратури, базова концепція транспіляції залишається сталою: фізичні та архітектурні обмеження визначають реальний спосіб виконання алгоритмів, а ефективність квантового програмного забезпечення безпосередньо залежить від їх урахування.

Список використаної літератури

1. Rakshit, P., et al. *Hardware Trojans in Quantum Circuits, Their Impacts, and Defense*. arXiv:2402.01552, 2024. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.01552
2. A simplified Mølmer-Sørensen gate for the trapped ion quantum computer // Hiroo Azuma. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.07855
3. Ji, Y.; Polian, I. Synergistic Dynamical Decoupling and Circuit Design for Enhanced Algorithm Performance on Near-Term Quantum Devices. Entropy 2024, 26, 586. https://doi.org/10.3390/e26070586
4. Native gates and operations // IBM Quantum Documentation. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://docs.quantum.ibm.com/guides/native-gates
5. How Does The Qiskit Transpiler Work? [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://medium.com/qiskit/how-does-the-qiskit-transpiler-work-6710863beaac
6. Byeongyong Park, Hansol Noh, Doyeol Ahn. Reducing T-Count in quantum string matching algorithm using relative-phase Fredkin gate. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.01283
7. Introduction to transpilation // IBM Quantum Documentation. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://docs.quantum.ibm.com/guides/transpile
8. Henry Zou, Matthew Treinish, Kevin Hartman, Alexander Ivrii, Jake Lishman. LightSABRE: A Lightweight and Enhanced SABRE Algorithm. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.08368
9. M. AbuGhanem. IBM Quantum Computers: Evolution, Performance, and Future Directions. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.00916
10. Transpiler stages // IBM Quantum Documentation. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://docs.quantum.ibm.com/guides/transpiler-stages

References

1. Rakshit, P., Naik, M., Nema, R., Sahu, A., Tripathi, S., Patel, R., Jha, R., Patnaik, S., & Rout, P. (2024). *Hardware Trojans in quantum circuits, their impacts, and defense*. arXiv preprint arXiv:2402.01552. https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.01552
2. Azuma, H. (2021). *A simplified Mølmer–Sørensen gate for the trapped ion quantum computer*. arXiv preprint arXiv:2112.07855. https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.07855
3. Ji, Y., & Polian, I. (2024). Synergistic dynamical decoupling and circuit design for enhanced algorithm performance on near-term quantum devices. *Entropy*, 26(7), 586. https://doi.org/10.3390/e26070586
4. IBM Quantum. (2023). *Native gates and operations*. IBM Quantum Documentation. https://docs.quantum.ibm.com/guides/native-gates
5. Qiskit. (2021). *How does the Qiskit transpiler work?* Qiskit Blog on Medium. https://medium.com/qiskit/how-does-the-qiskit-transpiler-work-6710863beaac
6. Park, B., Noh, H., & Ahn, D. (2024). *Reducing T-count in quantum string matching algorithm using relative-phase Fredkin gate*. arXiv preprint arXiv:2411.01283. https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.01283
7. IBM Quantum. (2023). *Introduction to transpilation*. IBM Quantum Documentation. https://docs.quantum.ibm.com/guides/transpile
8. Zou, H., Treinish, M., Hartman, K., Ivrii, A., & Lishman, J. (2024). *LightSABRE: A lightweight and enhanced SABRE algorithm*. arXiv preprint arXiv:2409.08368. https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.08368
9. AbuGhanem, M. (2024). *IBM Quantum Computers: Evolution, performance, and future directions*. arXiv preprint arXiv:2410.00916. https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.00916
10. IBM Quantum. (2023). *Transpiler stages*. IBM Quantum Documentation. https://docs.quantum.ibm.com/guides/transpiler-stages

УДК 004.9:37.091.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.41

Т. В. СЕРДЕНКО
кандидат фізико-математичних наук,
старший викладач кафедри інженерії, технологій та професійної освіти
Мукачівський державний університет
ORCID: 0000-0002-1157-6115

Т. Т. РЕЙС
старший викладач кафедри інженерії, технологій та професійної освіти
Мукачівський державний університет
ORCID: 0000-0002-4917-3928

ПЕРСОНАЛІЗАЦІЯ НАВЧАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

У статті досліджено персоналізоване навчання як сучасний педагогічний підхід, що стає ключовим елементом трансформації освіти в умовах цифровізації. Персоналізація розглядається як спосіб організації освітнього процесу, який враховує індивідуальні особливості, потреби та рівень підготовки кожного здобувача освіти. Акцент зроблено на ролі інформаційних систем як технологічної основи для реалізації цього підходу. У роботі охарактеризовано основні типи інформаційних систем, що підтримують персоналізацію: системи управління навчанням (LMS), адаптивні освітні платформи, сервіси навчальної аналітики, інструменти штучного інтелекту, а також мобільні та хмарні рішення. Описано принципи побудови індивідуальних освітніх траєкторій, використання адаптивного контенту, автоматизованого зворотного зв'язку, аналітичних панелей і рекомендаційних систем. Розглянуто як переваги впровадження персоналізованого навчання, так і пов'язані з цим виклики. До переваг віднесено зростання мотивації студентів, підвищення ефективності засвоєння знань, розвиток автономності в навчанні. Серед викликів виокремлено технічні обмеження закладів освіти, необхідність підвищення цифрової грамотності викладачів, етичні питання використання персональних даних і ризики цифрової нерівності. Наведено приклади реалізації персоналізованих освітніх рішень на міжнародному рівні (Khan Academy, Coursera, EdX, Open Learning Initiative) та в Україні (платформа Human, розширення Moodle). Визначено перспективи розвитку персоналізації у контексті впровадження інтелектуальних технологій, доповненої і віртуальної реальності, мікронавчання та побудови інтероперабельних освітніх екосистем. Стаття має науково-методичний характер і орієнтована на дослідників, викладачів та розробників цифрових освітніх рішень.

Ключові слова: *персоналізація навчання, інформаційні системи, адаптивні технології, освітня аналітика, індивідуальні освітні траєкторії.*

T. V. SERDENKO
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Engineering, Technology
and Professional Education
Mukachevo State University
ORCID: 0000-0002-1157-6115

T. T. REIS
Senior Lecturer at the Department of Engineering, Technology
and Professional Education
Mukachevo State University
ORCID: 0000-0002-4917-3928

TECHNOLOGY-DRIVEN PERSONALIZED LEARNING

The article explores personalized learning as a modern educational approach that is becoming a key component of the transformation of education in the context of digitalization. Personalized learning is considered as a method of organizing the educational process that takes into account individual characteristics, needs, and levels of preparedness of each learner. Special attention is given to the role of information systems as the technological foundation for implementing this approach. The study describes the main types of information systems that support personalization, including learning management systems (LMS), adaptive learning platforms, learning analytics services, artificial intelligence tools, as well as mobile and cloud-based solutions. The article outlines the principles of designing individual learning trajectories, the use of adaptive content, automated feedback, analytical dashboards, and recommendation engines. The paper discusses both the benefits and challenges of implementing personalized learning. Among the advantages are increased

learner motivation, more effective knowledge acquisition, and the development of autonomy in learning. Challenges include technical limitations of educational institutions, the need to improve the digital competence of educators, ethical concerns related to the use of personal data, and the risk of digital inequality. The article provides examples of personalized educational solutions from both international experience (Khan Academy, Coursera, EdX, Open Learning Initiative) and Ukrainian practice (Human platform, expanded functionality of Moodle). The prospects for the further development of personalization are examined in relation to the integration of intelligent technologies, augmented and virtual reality, microlearning, and the construction of interoperable educational ecosystems. The article is of a scientific and methodological nature and is intended for researchers, educators, and developers of digital learning environments.

Key words: *personalized learning, information systems, adaptive technologies, learning analytics, individual learning trajectories.*

Вступ

Сучасна освіта переживає стрімку трансформацію під впливом цифрових технологій та глобалізації знань. Одним із ключових викликів є забезпечення ефективного, гнучкого та орієнтованого на здобувача освіти навчального процесу [1]. У цьому контексті персоналізація навчання постає як провідна тенденція, що спрямована на підвищення індивідуальної залученості студентів, розвиток їхніх сильних сторін та побудову власної освітньої траєкторії [2].

Впровадження інформаційних систем у освітнє середовище відкриває нові можливості для реалізації персоналізованого підходу. Адаптивні навчальні платформи, системи управління навчанням (LMS), аналітичні інструменти та штучний інтелект дозволяють не лише оптимізувати процес навчання, але й глибше розуміти потреби, прогрес та потенціал кожного студента [3; 4; 5].

Постановка проблеми

Традиційні моделі навчання, що передбачають єдиний освітній підхід до всіх здобувачів, дедалі частіше виявляються недостатньо ефективними в умовах зростаючої різноманітності освітніх потреб, інтересів та рівнів підготовки студентів. Сучасні здобувачі освіти очікують гнучких, індивідуалізованих траєкторій навчання, що відповідають їхнім особистим темпам, стилям мислення та професійним цілям [5; 6]. Ці запити актуалізують необхідність переходу до персоналізованих моделей навчання, які можуть бути ефективно реалізовані за допомогою новітніх інформаційних систем [7; 8].

Попри наявність широкого спектра цифрових рішень, процес впровадження персоналізації залишається складним і неоднозначним: відсутність уніфікованих підходів, нерівномірний рівень цифрової грамотності педагогів, технічні та етичні виклики обмежують ефективне використання потенціалу інформаційних систем у навчанні [4; 7]. Це зумовлює потребу у теоретичному осмисленні та практичному аналізі можливостей, механізмів і перспектив персоналізації освітнього процесу в умовах цифрової трансформації.

Формулювання мети дослідження

Метою даної статті є дослідження механізмів персоналізації навчання за допомогою сучасних інформаційних систем, аналіз їхні переваг, викликів впровадження та окреслення перспектив розвитку цього напряму в умовах цифрової трансформації освіти.

Викладення основного матеріалу дослідження

Персоналізоване навчання (англ. *personalized learning*) – це освітній підхід, що враховує індивідуальні потреби, інтереси, здібності та темп засвоєння матеріалу кожного здобувача освіти. На відміну від традиційних моделей, де всі студенти отримують однаковий контент і виконують однакові завдання, персоналізоване навчання орієнтується на варіативність та гнучкість навчального процесу.

Основними характеристиками персоналізованого навчання є: індивідуалізація – адаптація змісту, форм і темпу навчання до конкретного студента; участь студента у формуванні освітньої траєкторії – здобувач освіти активно обирає навчальні цілі, ресурси та методи; адаптивність – використання технологій, які автоматично змінюють складність та зміст матеріалу відповідно до результатів навчання; зворотний зв'язок у режимі реального часу – регулярна оцінка прогресу та динамічне коригування навчального процесу.

Персоналізація ґрунтується на конструктивістській теорії навчання, яка розглядає знання як результат особистого досвіду та активної взаємодії з навчальним середовищем. У рамках цього підходу студент виступає не пасивним споживачем знань, а активним учасником, що співпрацює з викладачем, іншими студентами та інформаційними системами [1; 2].

У сучасному освітньому просторі персоналізація дедалі більше асоціюється з цифровими технологіями. Саме інформаційні системи стали ключовим інструментом, що дозволяє масштабувати персоналізоване навчання, робити його ефективним, автоматизованим і доступним. Таким чином, персоналізація виступає не просто педагогічною концепцією, а цілісною стратегією розвитку освіти в умовах цифрової епохи.

Інформаційні системи (ІС) відіграють дедалі важливішу роль у трансформації освітнього процесу, забезпечуючи цифрову інфраструктуру для збереження, обробки, передачі та аналізу освітньої інформації. У контексті персоналізованого навчання інформаційні системи виступають як технічна основа для створення індивідуальних траєкторій навчання, адаптації контенту та організації зворотного зв'язку.

Сучасні освітні інформаційні системи охоплюють широкий спектр платформ і технологій. Серед них особливе місце займають системи управління навчанням (LMS – Learning Management Systems) – програмні комплекси, що дозволяють організовувати, контролювати та аналізувати навчальний процес. Популярними прикладами таких систем є Moodle, Google Classroom, Canvas, OpenEdx. LMS надають можливості для формування курсів, інтеграції тестів, збору статистики щодо активності та успішності студентів. Важливою складовою освітнього середовища також є адаптивні освітні платформи – сервіси, які автоматично підлаштовують навчальний контент під потреби користувача на основі його результатів та поведінки. Такі системи зазвичай використовують алгоритми машинного навчання для аналізу динаміки навчання; прикладами є Knewton, Smart Sparrow, DreamBox [5]. Крім того, системи освітньої аналітики забезпечують збір та аналіз великих обсягів даних (Learning Analytics) з метою прогнозування навчальних результатів, виявлення ризиків та оптимізації педагогічних стратегій [4; 9]. Значну роль відіграють також платформи на основі штучного інтелекту (AI-powered EdTech), які здатні створювати персоналізовані рекомендації, формулювати запитання, виявляти прогалини у знаннях, а також генерувати адаптивний зворотний зв'язок у режимі реального часу [6; 10]. Нарешті, мобільні та хмарні сервіси, що забезпечують доступ до освітнього контенту в будь-який час і з будь-якого пристрою, стають важливими інструментами персоналізованого та змішаного навчання [4].

Інформаційні системи забезпечують не лише збереження та передачу навчального контенту, але й сприяють динамічній взаємодії між учасниками освітнього процесу, надаючи можливість реалізувати принципи доступності, адаптивності та індивідуалізації. Завдяки таким системам викладачі отримують інструменти для аналізу навчального прогресу, а студенти – підтримку у власному темпі та стилі навчання. Інформаційні системи створюють фундамент для реалізації персоналізованих освітніх стратегій, дозволяючи переходити від масового навчання до індивідуально-орієнтованого підходу.

Механізми персоналізації в інформаційних системах базуються на аналізі індивідуальних характеристик здобувача освіти, його навчальної активності, результатів і уподобань. Одним із ключових інструментів персоналізованого підходу є адаптивний контент, який автоматично підлаштовується під рівень підготовки студента. Це дозволяє уникнути як перевантаження складним матеріалом, так і втрати мотивації через занадто прості завдання. Завдяки такому підходу навчальний матеріал стає більш релевантним і доступним для кожного.

Інформаційні системи також дають можливість формувати індивідуальні освітні траєкторії, що враховують попередній досвід навчання, цілі студента та бажаний темп опанування матеріалу. Користувачі можуть самостійно обирати послідовність тем, формати подання інформації – текст, відео, симуляції – а також типи завдань, що найкраще відповідають їхнім стилям навчання.

Важливу роль у забезпеченні персоналізації відіграє освітня аналітика. Інформаційні системи фіксують детальні дані про діяльність студента: результати тестів, час виконання завдань, частоту входу в систему, участь у дискусіях тощо. Ці дані обробляються автоматично, дозволяючи системі надавати гнучкий зворотний зв'язок у режимі реального часу, а викладачам – оперативно виявляти труднощі та реагувати на них.

Ще одним ефективним механізмом є рекомендаційні системи. Вони аналізують поточний рівень знань студента та його активність, формуючи персональні поради щодо подальшого навчання: які теми повторити, які додаткові ресурси переглянути, яку траєкторію обрати для кращого засвоєння матеріалу. Це сприяє підвищенню мотивації та залученості у процес навчання.

Широке використання штучного інтелекту відкриває нові горизонти для персоналізації. Інтелектуальні агенти, чат-боти, автоматизовані тьютори та адаптивні тестові системи дозволяють підтримувати студента в індивідуальному режимі, реагуючи на його запити й забезпечуючи постійну підтримку у навчанні [5; 6]. Завдяки ІТ-технологіям персоналізація навчання з кожним роком стає дедалі точнішою, масштабованішою та ефективнішою.

Персоналізоване навчання за допомогою інформаційних систем відкриває нові можливості для підвищення ефективності освітнього процесу. Серед основних переваг варто виділити індивідуалізацію підходу до кожного студента, що сприяє глибшому засвоєнню знань і розвитку особистої відповідальності за навчання. Такий підхід дозволяє враховувати рівень підготовки, стиль сприйняття інформації, мотивацію та інтереси кожного здобувача освіти, тим самим створюючи комфортне середовище для навчання [3].

Інформаційні системи значно підвищують гнучкість освітнього процесу. Студенти мають можливість навчатись у зручний для себе час, у власному темпі та з доступом до різних форматів матеріалів. Викладачі, у свою чергу, отримують інструменти для точного моніторингу успішності та оперативного реагування на труднощі у навчанні. Це дозволяє оптимізувати педагогічну взаємодію, переходячи від масового до індивідуального навчання.

Попри суттєві переваги, персоналізоване навчання супроводжується низкою викликів. Передусім, це технічні обмеження: не всі освітні заклади мають достатні ресурси для впровадження потужних інформаційних систем, адаптивних платформ чи хмарних рішень. Додатковою складністю є потреба у підготовці педагогів, які повинні володіти цифровими навичками та розуміти принципи персоналізованого підходу [8; 10].

Організаційні виклики також включають перебудову навчальних планів і підходів до оцінювання, що часто вимагає часу, зусиль і додаткових методичних розробок. Не менш важливими є етичні та правові аспекти:

використання персональних даних студентів у процесі аналітики й адаптації викликає питання щодо конфіденційності, захисту інформації та згоди на обробку даних.

Варто також зазначити ризик технологічної нерівності. Студенти з обмеженим доступом до інтернету або сучасних пристроїв можуть опинитися у невигідному становищі, що суперечить ідеї рівного доступу до якісної освіти. Тому впровадження персоналізації вимагає системного підходу, що включає технічне забезпечення, підвищення цифрової грамотності, етичну регламентацію та підтримку інклюзивного освітнього середовища. Персоналізоване навчання має значний потенціал для трансформації освітнього процесу, проте його ефективне застосування можливе лише за умови врахування й подолання низки викликів як технічного, так і педагогічного характеру.

Реалізація персоналізованого навчання за допомогою інформаційних систем набуває дедалі більшого поширення як у світовій, так і в українській освітній практиці. Університети, коледжі, школи та корпоративні освітні платформи активно впроваджують технологічні рішення, що дозволяють адаптувати освітній процес до потреб окремих здобувачів освіти.

Одним із найвідоміших міжнародних прикладів є використання платформи *Khan Academy*, яка завдяки вбудованим інструментам аналітики та адаптації пропонує кожному учневі індивідуальну траєкторію вивчення математики, природничих наук та інших дисциплін. Платформа аналізує відповіді користувача, визначає слабкі місця й пропонує відповідні вправи або відеоуроки. Подібний підхід застосовується й на платформах *Coursera*, *EdX*, де навчальні курси містять адаптивні завдання, автоматичний супровід прогресу та персональні рекомендації щодо подальшого навчання.

У контексті вищої освіти прикладом впровадження персоналізованого навчання є система *Open Learning Initiative* Університету Карнегі-Меллон, що використовує адаптивні навчальні модулі, інтегровані з аналітичними панелями для викладачів. Завдяки цьому викладачі можуть отримувати докладну інформацію про те, як саме студенти взаємодіють з матеріалом, і своєчасно коригувати навчальний процес [4; 5].

В Україні також з'являються ініціативи, орієнтовані на персоналізацію. Наприклад, система *Human*, яка використовується в низці шкіл та закладів вищої освіти, пропонує цифрове середовище з індивідуальними кабінетами учнів, журналами успішності, електронними розкладом і бібліотекою. Деякі заклади вищої освіти розробляють власні адаптивні освітні платформи або інтегрують функції персоналізації в базові системи управління навчанням, як-от *Moodle*. Використання плагінів аналітики, таких як *Learning Analytics Dashboard*, дозволяє викладачам слідкувати за динамікою прогресу студентів та будувати індивідуальні маршрути навчання [5].

У корпоративному секторі компанії, що займаються навчанням персоналу, активно застосовують персоналізовані платформи, засновані на машинному навчанні. Такі рішення дозволяють виявити прогалини в знаннях працівників, автоматично формувати рекомендовані курси й навіть моделювати потенційні кар'єрні траєкторії.

Отже, практика демонструє, що персоналізація за допомогою інформаційних систем – це не лише теоретична модель, а цілком реальний і результативний підхід, який вже сьогодні впроваджується в різних освітніх контекстах. Успішний досвід таких впроваджень свідчить про високу ефективність персоналізованого навчання та актуальність подальших інвестицій у розвиток відповідних технологій.

Персоналізація навчання продовжує розвиватися під впливом новітніх технологій та змін у підходах до освіти. Найбільш перспективним напрямом є інтеграція штучного інтелекту, що дозволяє створювати інтелектуальні освітні середовища, які не лише адаптують контент, але й імітують функції тьютора або наставника [10]. AI-системи вже здатні аналізувати поведінкові патерни студентів, передбачати труднощі у навчанні та надавати гнучкі, контекстуально обґрунтовані рекомендації. У майбутньому такі системи зможуть автоматично створювати індивідуальні навчальні курси відповідно до рівня знань, стилю мислення та кар'єрних цілей кожного здобувача.

Розвиток мобільних технологій і хмарних сервісів відкриває нові горизонти для персоналізації, оскільки навчання стає доступним незалежно від місця, часу та пристрою. Зростає популярність мікронавчання – формату, в якому освітній матеріал подається у вигляді коротких, легко засвоюваних модулів. Такий підхід ідеально поєднується з персоналізацією, адже дозволяє оперативно формувати індивідуальні набори знань для конкретних цілей і завдань.

Ще одним важливим напрямом є розвиток технологій доповненої (AR) та віртуальної (VR) реальності, що дозволяють створювати навчальні симуляції, максимально наближені до реального середовища. У поєднанні з аналітикою та адаптивними механізмами ці технології сприяють ще більш глибокій персоналізації, особливо у сферах, що вимагають практичного досвіду: медицині, інженерії, авіації, технічних науках [4; 10].

Окрему перспективу становить розвиток інтероперабельності освітніх систем – тобто здатності різних платформ і сервісів взаємодіяти між собою. Це дає змогу створювати цілісні освітні екосистеми, де персоналізовані дані супроводжують студента протягом усього навчального шляху – від школи до вищої освіти чи професійного розвитку.

Однак зростання технологічної складності вимагає не лише технічної модернізації, але й педагогічної переорієнтації. З'являється потреба у нових підходах до розробки навчальних програм, оцінювання результатів, а також у підготовці педагогів, здатних ефективно використовувати персоналізовані інструменти в навчальному процесі.

У майбутньому персоналізоване навчання, ймовірно, стане стандартом освітньої практики, а не винятком. За умови відповідної інфраструктурної та методичної підтримки, воно має потенціал значно підвищити якість освіти, її доступність, справедливість і відповідність потребам конкретної особистості та суспільства загалом [1; 2; 4].

Висновки

У статті розглянуто сутність персоналізованого навчання та визначено ключову роль інформаційних систем у його реалізації. Персоналізація як освітня стратегія дозволяє зробити навчальний процес більш гнучким, ефективним і орієнтованим на потреби кожного здобувача освіти. Інформаційні системи, зокрема адаптивні платформи, системи аналітики, рекомендаційні сервіси та інструменти штучного інтелекту, забезпечують технічну основу для реалізації індивідуалізованих освітніх траєкторій. Проаналізовано переваги персоналізованого навчання, серед яких – підвищення мотивації, залученості, глибини засвоєння знань та розвиток навичок самостійного навчання. Водночас визначено низку викликів, пов'язаних із технічними, педагогічними, організаційними й етичними аспектами впровадження персоналізації. Практичні приклади впровадження таких підходів у закладах освіти України та світу свідчать про реальні результати й потенціал цього напряму. У перспективі очікується подальше зростання ролі персоналізованого навчання в освітніх системах завдяки розвитку штучного інтелекту, мобільних і хмарних технологій, віртуальної реальності та інтероперабельних освітніх екосистем. Це зумовлює необхідність системної підтримки таких трансформацій на рівні освітньої політики, інфраструктури та підготовки педагогічних кадрів. Отже, персоналізація навчання за допомогою інформаційних систем є не лише сучасним викликом, а й стратегічною відповіддю на потреби нової освітньої реальності, що формує компетентного, відповідального й адаптивного фахівця майбутнього.

Список використаної літератури

1. Грищенко О. В., Коваленко І. В. Розвиток української освітньої системи в контексті Четвертої промислової революції. *Освіта та розвиток обдарованої особистості*. 2023. № 3(86). С. 15–20.

2. Бойко О. Г., Семеріков С. О., Триус Ю. В. Персоналізація навчання через адаптивні технології в контексті сталого розвитку освіти вчителів. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2020. № 3(77). С. 1–15. DOI: https://doi.org/10.33407/itlt.v77i3.3522

3. Семеріков С. О. Сучасні інформаційні технології в освіті: методологія та досвід впровадження. Київ : Міленіум, 2020. 312 с.

4. Kozma R. B. The Effectiveness of Technology-Supported Personalised Learning in Low- and Middle-Income Countries: A Meta-Analysis. *British Journal of Educational Technology*. 2021. Vol. 52(2). P. 778–799. DOI: https://doi.org/10.1111/bjet.13116

5. Wang S., Christensen C., Cui W., Tong R., Yarnall L. A Systematic Literature Review of Personalized Learning Terms. *Smart Learning Environments*. 2020. Vol. 7. Article 15. DOI: https://doi.org/10.1186/s40561-020-00140-9

6. Smith A. Personalized Learning and AI: Revolutionizing Education. *Forbes*. 2024. URL: https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2024/07/22/personalized-learning-and-ai-revolutionizing-education

7. Закон України «Про освіту» від 5 вересня 2017 р. № 2145-VIII. *Відомості Верховної Ради України*. 2017. № 38–39. Ст. 380.

8. Про схвалення Концепції розвитку STEM-освіти в Україні : наказ Міністерства освіти і науки України від 05.08.2020 № 960. URL: https://mon.gov.ua/ua/npa/pro-skhvalennya-koncepciyi-rozvitku-stem-osviti-v-ukrayini

9. Xu B., Recker M. Teaching Analytics: A Clustering and Triangulation Study of Digital Library User Data. *Educational Technology & Society*. 2012. Vol. 15(3). P. 103–115.

10. Woolf B. P. *Building Intelligent Interactive Tutors: Student-Centered Strategies for Revolutionizing E-Learning*. Burlington : Morgan Kaufmann, 2009. 381 p.

References

1. Hryshchenko, O. V., & Kovalenko, I. V. (2023). Rozvytok ukrainskoi osvitnoi systemy v konteksti Chetvertoi promyslovoi revoliutsii [Development of the Ukrainian educational system in the context of the Fourth Industrial Revolution]. *Osvita ta rozvytok obdarovanoi osobystosti – Education and Development of Gifted Personality*, *3*(86), 15–20.

2. Boiko, O. H., Semerikov, S. O., & Trius, Yu. V. (2020). Personalizatsiia navchannia cherez adaptyvni tekhnolohii v konteksti staloho rozvytku osvity vchyteliv [Personalization of learning through adaptive technologies in the context of sustainable teacher education development]. *Informatsiini tekhnolohii i zasoby navchannia – Information Technologies and Learning Tools*, *3*(77), 1–15. https://doi.org/10.33407/itlt.v77i3.3522

3. Semerikov, S. O. (2020). *Suchasni informatsiini tekhnolohii v osviti: Metodolohiia ta dosvid vprovadzhennia* [Modern information technologies in education: Methodology and implementation experience]. Kyiv : Milenium.

4. Kozma, R. B. (2021). The effectiveness of technology-supported personalised learning in low- and middle-income countries: A meta-analysis. *British Journal of Educational Technology*, *52*(2), 778–799. https://doi.org/10.1111/bjet.13116

5. Wang, S., Christensen, C., Cui, W., Tong, R., & Yarnall, L. (2020). A systematic literature review of personalized learning terms. *Smart Learning Environments*, *7*, Article 15. https://doi.org/10.1186/s40561-020-00140-9

6. Smith, A. (2024). Personalized learning and AI: Revolutionizing education. *Forbes*. https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2024/07/22/personalized-learning-and-ai-revolutionizing-education

7. Zakon Ukrainy "Pro osvitu" vid 5 veresnia 2017 r. № 2145-VIII. (2017). *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*, *38–39*, St. 380. [Law of Ukraine «On Education» of September 5, 2017, No. 2145-VIII]. (In Ukrainian).

8. Pro skhvalennia Kontseptsii rozvytku STEM-osvity v Ukraini: Nakaz Ministerstva osvity i nauky Ukrainy vid 05.08.2020 № 960. (2020). Retrieved from https://mon.gov.ua/ua/npa/pro-skhvalennya-koncepciyi-rozvitku-stem-osviti-v-ukrayini

9. Xu, B., & Recker, M. (2012). Teaching analytics: A clustering and triangulation study of digital library user data. *Educational Technology & Society*, *15*(3), 103–115.

10. Woolf, B. P. (2009). *Building intelligent interactive tutors: Student-centered strategies for revolutionizing e-learning*. Burlington: Morgan Kaufmann.

УДК 681.5.004 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.42

О. В. СИТНІКОВ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-6806-1665

О. О. КВІТКА
кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-4034-7052

К. Ю. ЖЛОБІНСЬКА
магістрант кафедри технічних та програмних засобів автоматизації
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-6681-4451

Д. С. ОНИЩЕНКО
аспірант кафедри технічних та програмних засобів автоматизації
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0008-4276-4443

СТВОРЕННЯ АНКЛАВІВ БЕЗПЕКИ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОЇ МЕРЕЖІ ПРОЦЕСУ ПАРО-ВОДНЕВОЇ КОНВЕРСІЇ МЕТАНУ

В статті, створення анклавів безпеки для промислової мережі процесу паро-водневої конверсії метан, авторів Ситнікова О. В., Квітки О. О., Жлобінської К. Ю. та Онищенко Д. С. наведено задача розробки структури мережі захисту периметрів анклавів у контексті зв'язку між ними та визначення критичності. Представлено структуру мережі, що складається з трьох основних рівнів, кожен з яких надає змогу виконувати конкретні задачі: корпоративний, операторський, виробничий.

Наведено загальний опис процесу паро-водневої конверсії метану. Вказано який саме контур буде розглядатися в дослідженнях – мережа компресора природного газу, оскільки саме з етапу подачі стиснутого в компресорі до необхідного тиску природного газу до наступного апарату підігрівача й починається сам процес виробництва.

Мережа розділена на функціональні групи, що базуватимуться на контурах, відповідних правилах підключень та згідно рівнів мережі. В дослідженнях керувалися принципом, що функціональні групи відповідають зазначеним рівням мережі, а отже пристрої належать до конкретної групи, якщо розташовані в спільній для них визначеній підмережі.

Наведено, що зі статистичної точку зору найчастіше виникають аварії на виробництві за рахунок відхилення технологічних параметрів від нормативних значень. Оскільки дані типи аварій призводять не тільки до виготовлення бракованої продукції, а й до аварій виробництва з наслідками для працівників, то вищий рівень критичності слід встановити для самих технологічних установок аналогічно до найвищого рівня.

Наведено принцип визначення периметрів, що відповідає рівню схеми – корпоративної, операторської, виробничої мережі, підсистеми керування компресором. В результаті проведених досліджень Представлено та запрограмовано схему захисту периметрів анклавів у контексті зв'язку між ними, із зазначенням відповідних засобів нагляду за потоками даних. За результатами проведених досліджень, створено запит на вибір технічних і програмних засобів кібербезпеки.

Ключові слова: *конверсія метану, кібербезпека, анклав безпеки програмування, моделювання складних систем.*

O. V. SYTNIKOV
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Automation Hardware and Software Department
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-6806-1665

O. O. KVITKA
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Automation Hardware and Software Department
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0003-4034-7052

K. U. ZHLOBINSKA
Master's Degree Automation Hardware and Software Department
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0001-6681-4451

D. S. ONYSHCHENKO
Postgraduate Student at the Automation Hardware and Software Department
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0009-0008-4276-4443

CREATION OF SAFETY ENCLAVES FOR THE INDUSTRIAL NETWORK OF THE STEAM-HYDROGEN METHANE CONVERSION PROCESS

In the article, creation of safety enclaves for the industrial network of the steam-hydrogen metan conversion process, authored by Sytnikov O. V., Kvitka O. O., Zhlobinska K. U. and Onyshchenko D. S., the task of developing a network structure for protecting enclave perimeters in the context of their connection and determining criticality is presented. The network structure is presented, consisting of three main levels, each of which allows performing specific tasks: corporate, operator, production.

A general description of the process of steam-hydrogen conversion of methane is given. It is indicated which circuit will be considered in the studies – the natural gas compressor network, since it is from the stage of supplying natural gas compressed in the compressor to the required pressure to the next heater device that the production process itself begins.

The network is divided into functional groups, which will be based on circuits, corresponding connection rules and according to network levels. The studies were guided by the principle that functional groups correspond to the specified network levels, and therefore devices belong to a specific group if they are located in a common subnet defined for them.

It is stated that from a statistical point of view, accidents in production most often occur due to deviations of technological parameters from standard values. Since these types of accidents lead not only to the production of defective products, but also to production accidents with consequences for employees, a higher level of criticality should be set for the technological installations themselves, similar to the highest level.

The principle of determining perimeters is presented, which corresponds to the level of the scheme – corporate, operator, production network, compressor control subsystem. As a result of the research, a scheme for protecting the perimeters of enclaves in the context of communication between them is presented and programmed, indicating the appropriate means of monitoring data flows. Based on the results of the research, a request for the selection of technical and software cybersecurity tools is created.

Key words: *conversion of methane, cybersecurity, security enclave, programming, modeling of complex systems.*

Постановка проблеми

Паро-воднева конверсія метану – сукупність технологічних процесів розроблена для отримання водню шляхом реакції з насиченою водяною парою в якості теплоносія. Економічний ефект виробництва значною мірою залежить від організації безпекових режимів роботи промислової мережі. Процес відбувається в декілька стадій [1–2]. Створення анклавів безпеки для промислової мережі підприємства, що складається з трьох основних рівнів, є запорукою безпечного перебігу технологічного процесу [3].

Також необхідним виступає задача по створено запит на вибір технічних і програмних засобів кібербезпеки мережі підприємства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз технологічного процесу паро-водневої конверсії метану, розглянуто в роботах [2–6], максимальна увага приділяється тепло-енергетичним процесам, що відбуваються в реакторі. Розглянуті питання моделювання об'єкту керування та моделювання та синтез системи керування як складної системи [3, 6]. Запрограмовано регулятор, що представляє собою програмований логічний контролер (ПЛК), для автоматизованого керування виробничими процесами [4, 5].

Однак, в приведених дослідженнях відсутні принципи моделювання, програмування та створення системи кібербезпеки мережі.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи виступає створення та дослідження структури мережі захисту периметрів анклавів у контексті зв'язку між ними та алгоритму визначення критичності активу.

Викладення основного матеріалу дослідження

Структура мережі складається з трьох основних рівнів, кожен з яких надає змогу виконувати специфічні функції: корпоративний (є основною точкою входу мережі, відповідає за керування підприємством, включаючи адміністрування раду процесів, управління ресурсами, комунікацію), операторський (призначений для моніторингу в реальному часі процесів та систем операторами, дає змогу операторам відслідковувати та реагувати на певні події, збої, збирати та аналізувати дані), виробничий (призначений для безпосереднього керування технологічним процесом, включає в себе пристрої та системи задіяні в процесі).

Мережа складається з зазначених вище рівнів. В межах мережі є один маршрутизатор, підключений до всіх рівнів. Кожен рівень має специфічну структуру. Процес дослідження, моделювання та програмування системи відноситься до моделювання складних систем керування.

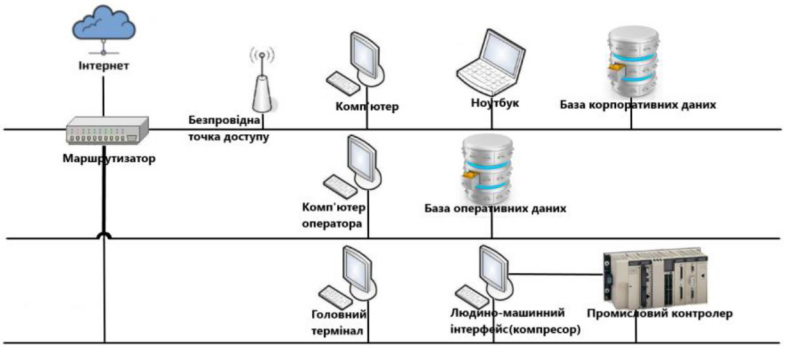


Рис. 1. Структура мережі підприємства

Корпоративний рівень складається з: 1) безпровідної точки доступу Wi-Fi (для бездротового доступу до мережі інших пристроїв); 2) корпоративних комп'ютера та ноутбука (для співробітників і виконання ними корпоративних функцій); 3) корпоративної бази даних (для централізованого зберігання даних корпоративного рівня).

Операторський рівень складається з: 1) комп'ютера оператора (робоча станція оператора); 2) бази даних з оперативними даними (для централізованого зберігання даних про стан та деталі перебігу виробничого процесу).

Виробничий рівень складається з: 1) головного терміналу (центральна та основна робоча станція для управління всіма процесами виробництва); 2) людино-машинного інтерфейсу (ЛМІ) (інтерфейс для зручності керування та роботи з відповідними даними про перебіг процесу виробництва в реальному часі); 3) промислового контролера (програмований логічний контролер – ПЛК – для автоматизованого керування виробничими процесами).

Розглянемо загальний опис процесу паро-водневої конверсії метану [2–3]. Природний газ, стиснений в компресорі до тиску 4 МПа, проходить підігрівач, обігрівається димовими газами конвертора метану, і надходить в систему очищення газу від сірчистих сполук. Система складається з реактора каталітичного гідрування і адсорбера сірководню. Очищений від сполук сірки природний газ надходить в сатуратор (пароносійну вежу), в якій змішується з водяною парою в співвідношенні H_2O: газ = 4:1. Новоутворена парогазова суміш підігрівається до 380 °С в теплообміннику і подається в трубчастий конвертер парової конверсії метану (I ступінь). Трубки конвертера обігріваються за рахунок спалювання в ньому метану, забезпечуючи температуру 800 °С. Після першого ступеня конверсії газ, що містить до 10 % об. залишкового метану і водяну пару в відношенні 0,8:1, направляється в шахтний конвертер повітряної конверсії метану (II ступінь), в який вводиться підігріте повітря. При цьому в конвертері за рахунок екзотермічності реакції (г) підтримується автотермічний режим роботи. З реактора конвертований газ при температурі 900–1000 °С надходить в котел-утилізатор *8*, в якому виробляється пар високих параметрів (10 МПа, 480 °С). Потім охолоджений до 380 °С газ послідовно проходить конвертер оксиду вуглецю (II) I ступеня, котел-утилізатор, в якому додатково охолоджується до 25 °С, і конвертер оксиду вуглецю (II) II ступеня. Вихідний з конвертера газ містить всього 0,5 % обсягу оксиду вуглецю (II). Для видалення з газу утвореного в результаті конверсії оксиду вуглецю (IV) газ проходить через зрошуваний водою скрубер, в якому охолоджується до 30 °С і направляється на етаноламінне очищення в скрубер і регенератор.

Через складну будову виробництва в роботі розглянуто (змодельовано складну систему) лише частину виробничої мережі з метою створення системи кібербезпеки – мережа компресора природного газу, оскільки саме з етапу подачі стиснутого в компресорі до необхідного тиску природного газу до наступного апарату підігрівача й починається сам процес виробництва. В межах даної мережі наведено один ПЛК, що відповідає за автоматизовану роботу та управління роботою компресора. Контур в межах досліджуваної мережі забезпечує контроль витрати природного газу, що надходить до компресору та керування роботою компресора природного газу.

Мережа розділена на функціональні групи, що базуватимуться на контурах, відповідних правилах підключень та згідно рівнів мережі. В дослідженнях керувалися принципом, що функціональні групи відповідають

зазначеним рівням мережі, а отже пристрої належать до конкретної групи, якщо розташовані в спільній для них визначеній підмережі.

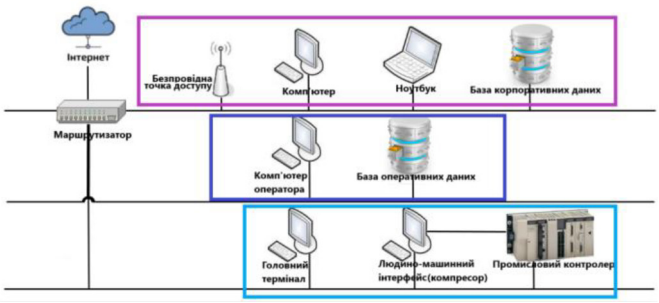


Рис. 2. Функціональні групи за підключенням до мережі

Розбиття на основі контурів керування. Керувалися тим, що якщо контури керування підключені до одного польового керівного пристрою, то слід вважати однією функціональною групою. Відповідну групу підключено до шини *RS*-485 (рис. 3).



Рис. 3. Функціональна група за належністю до контурів керування

Розбиття на основі диспетчерського керування, або підключення до ЛМІ диспетчерів. Керувалися правилом, що до однієї функціональна групи мають належати головний термінал, ЛМІ компресора та ПЛК (рис. 4).



Рис. 4. Функціональна група за підключенням до ЛМІ диспетчерів

Розбиття на основі процесів керування. В даному випадку за процес керування відповідають комп'ютер оператора, головний термінал та ЛМІ (рис. 5).

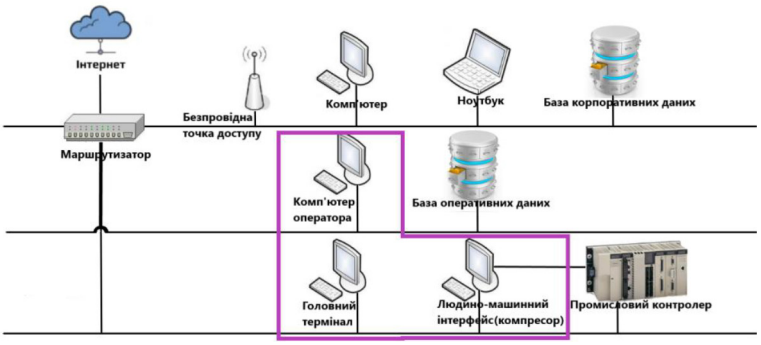


Рис. 5. Функціональна група за процесами керування

Розбиття на основі доступу до даних процесів керування. Проаналізовано кому і на якому рівні надано доступ до якого типу даних. В межах дослідженої мережі доступ до даних виробничого рівня та операторського рівня мають всі, єдина ланка корпоративного рівня, що не має доступу до означених даних, це сама база даних корпоративного рівня, оскільки це не має сенсу. Користувачі корпоративного рівня отримують дані з інших рівнів посилаючи запити на отримання.

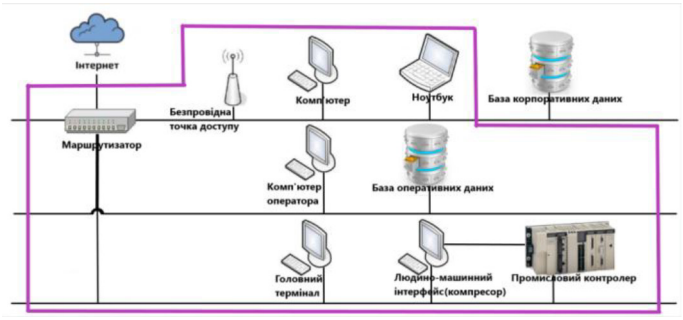


Рис. 6. Функціональна група за доступом до даних процесів керування

Розбиття на основі користувачів і їхніх ролей. Означено які користувачі мають доступ до яких ланок якого рівня. В нашому випадку кожен працівник/користувач має доступ до відповідних ланок мережі виключно на рівні цієї ж мережі, окрім оператора, оскільки для постановки задач на виробництво і виконання конкретних клієнтських замовлень йому треба доступ до корпоративної бази даних.

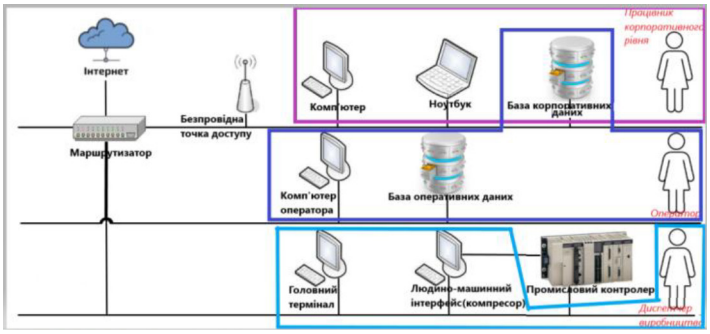


Рис. 7. Функціональні групи за користувачами та ролями

Розбиття на основі протоколів та межі застосування протоколів *Ethernet, Http, Ethernet* промисловий та *Modbus*.

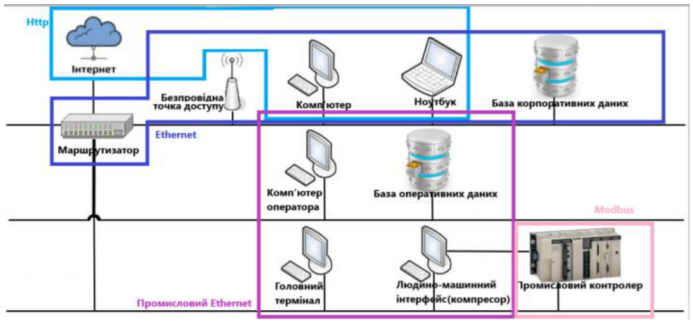


Рис. 8. Функціональні групи на основі протоколів

Визначення критичності кожного пристрою мережі, що зроблено за алгоритмом.

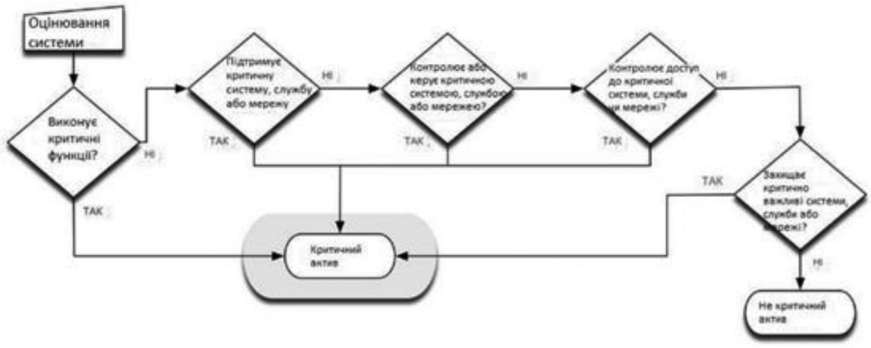


Рис. 9. Схема алгоритму визначення критичності активу

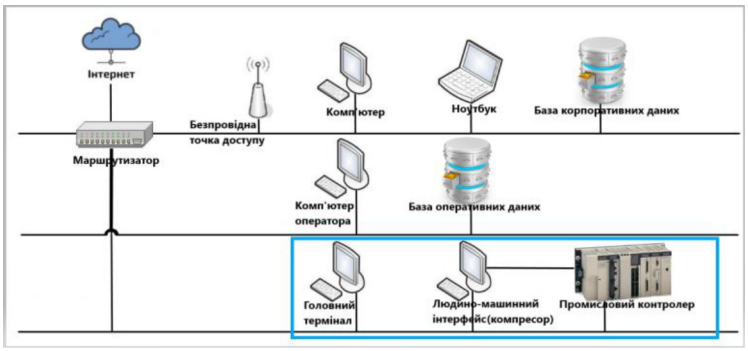


Рис. 10. Функціональна група за критичністю

Зі статистичної точку зору найчастіше виникають аварії на виробництві за рахунок відхилення технологічних параметрів від нормативних значень. Оскільки дані типи аварій призводять не тільки до виготовлення бракованої продукції, а й до аварій виробництва з наслідками для працівників, то вищий рівень критичності слід встановити для самих технологічних установок аналогічно до рівня критичності устаткування – 5-ого (найвищого). Інші активи не можна визначити як критичні, оскільки вони не беруть участь в роботі контурів керування та контролю.

Розбиття мережі на анклави безпеки [7–8].

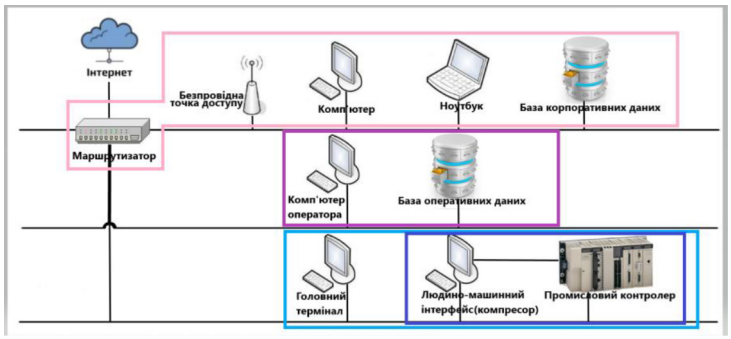


Рис. 11. Анклави безпеки пристроїв мережі

До мережі операторського рівня пізніше підібрано архітектуру її захисту.



Рис. 12. Анклави безпеки та зв'язки між ними

Розроблено та запрограмовано схему двоспрямованих зв'язків між наведеними вище базпековими анклавами [7–8].

Периметри визначатимуться згідно рівнів попередньої схеми: 1) периметр корпоративної мережі (має вихід в інтернет, має безпровідну точку доступу, з'єднана з операторською мережею по протоколу *Ethernet*); 2) периметр операторської мережі (з'єднана з корпоративною мережею по протоколу *Ethernet*, з виробничою – промисловий *Ethernet*); 3) периметр виробничої мережі (з'єднана з операторською мережею через промисловий *Ethernet*, з підсистемою керування компресором – промисловий *Ethernet*); 4) периметр підсистеми керування компресором (вона всередині мережі виробничого рівня, з нею з'єднана через промисловий Ethernet).

Схему захисту периметрів анклавів у контексті зв'язку між ними зображено на рис. 13. Біля анклавів зазначено відповідні засоби нагляду за потоками даних: системи виявлення загроз (IDS), системи запобігання загрозам (IPS), білі списки застосунків (AWL), моніторинг прикладного рівня (МПР), антивірус (Antivirus), віртуальна приватна мережа (VPN), багатофакторна аутентифікація (MFA).

Промислові *Firewall*-и треба налаштовувати так: дозволяти виключно передачі лише з відомих конкретних *IP*-адрес на відомі адреси та з безпечних портів на визначені порти. Встановлення підключення *Windows* пристрою адміністратора, знаючи порт, що використовується на виробництві.



Рис. 13. Захист периметрів анклавів у контексті зв'язку між ними

За результатами проведених досліджень, створено запит на вибір технічних і програмних засобів кібербезпеки:

IPS для ПК (*McAfee*) – комплексне рішення для запобігання вторгненням, що включає виявлення мережевих атак і блокування шкідливого трафіку.

Firewall для різних мереж (*Fortinet*) – високопродуктивний міжмережевий екран з підтримкою *VPN*, захистом від *DDoS* атак та гнучким управлінням безпековими правилами.

Firewall для критично важливих мереж (*Check Point*) – високоефективний міжмережевий екран з функціями сегментації мережі, глибокого аналізу трафіку та захисту від новітніх загроз.

IDS (*Suricata*) – сучасна система виявлення вторгнень з високою продуктивністю та можливостями аналізу мережевого трафіку для виявлення загроз.

Антивірус для серверу (*Bitdefender*) – антивірус для серверів з функціями реального часу, автоматичними оновленнями та широким спектром інструментів управління безпекою.

Висновки

В результаті проведених досліджень було виведено та досліджено структури мережі захисту периметрів анклавів, алгоритму визначення критичності активу та представлено вибір технічних і програмних засобів кібербезпеки.

Список використаної літератури

1. Woolf P. та ін. 6.4: ODE and Excel CSTR model with heat exchange [Електронний ресурс] // Engineering LibreTexts. 11.03.2023. URL: https://eng.libretexts.org/…/6.04%3A_ODE_and_Excel_CSTR_model_with_heat_exchange (дата звернення: 11.05.2025).

2. Blevins M. Control and Field Instrumentation Documentation (Chapter 7) [Електронний ресурс] / International Society of Automation. URL: https://www.isa.org/getmedia/e122051e-8c8c-48be-97ef-5d344c585771/Chapter7_Control (дата звернення: 14.05.2025).

3. Kimray. How to Read an Oil & Gas P&ID: Reference Guide [Електронний ресурс]. URL: https://kimray.com/sites/default/files/uploads/training-demos/Kimray%20 How%20to%20Read%20an%20Oil%20%26%20Gas%20P%26ID%20Reference%20Guide.pdf (дата звернення: 16.05.2025).

4. European Industrial Gases Association. DOC 172/24 – Combustion Safety for Steam Reformer Operation [Електронний ресурс]. 2024. URL: https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC172.pdf (дата звернення: 17.05.2025).

5. Steam boiler drum level measurement technology comparison: DP vs. GWR [Електронний ресурс] // VEGA Blog. 2020. URL: https://www.vega.com/en-us/company/blog/2020/steam-boiler-drum-level-measurement-technology-comparison (дата звернення: 18.05.2025).

6. Cahill J.; Petrishchev L. Hydrogen Production with Steam Methane Reforming and CCUS [Електронний ресурс]. Emerson Automation Experts, 07.04.2023. URL: https://www.emersonautomationexperts.com/2023/sustainability/hydrogen-production-steam-methane-reforming-ccus/ (дата звернення: 19.05.2025).

7. G. Belani, The Use of Artificial Intelligence in Cybersecurity: A Review. URL: https://www.computer.org/publications/tech-news/trends/the-use-ofartificial-intelligence-in-cybersecurity (дата звернення: 20.05.2025)

8. Лісовська Ю. П. Кібербезпека: ризики та заходи: навч. посібник. Київ : Видавничий дім «Кондор», 2019. 272 с.

References

1. Woolf P. та ін. 6.4: ODE and Excel CSTR model with heat exchange // Engineering LibreTexts. 11.03.2023. URL: https://eng.libretexts.org/…/6.04%3A_ODE_and _Excel_CSTR_model_with_heat_exchange (date of application: 11.05.2025). [in English]

2. Blevins M. Control and Field Instrumentation Documentation (Chapter 7) / International Society of Automation. URL: https://www.isa.org/getmedia/e122051e-8c8c-48be-97ef-5d344c585771/ Chapter7_Control (date of application: 14.05.2025). [in English]

3. Kimray. How to Read an Oil & Gas P&ID: Reference Guide. URL: https://kimray.com/sites/default/files/uploads/training-demos/Kimray%20How%20to%20Read%20an%20Oil%20%26%20Gas%20P%26ID%20Reference%20Guide.pdf (date of application: 16.05.2025). [in English].

4. European Industrial Gases Association. DOC 172/24 – Combustion Safety for Steam Reformer Operation. 2024. URL: https://www.eiga.eu/uploads/ documents/DOC172.pdf (date of application: 17.05.2025). [in English].

5. Steam boiler drum level measurement technology comparison: DP vs. GWR // VEGA Blog. 2020. URL: https://www.vega.com/en-us/company/blog/2020/steam-boiler-drum-level-measurement-technology-comparison (date of application: 18.02.2025). [in English].

6. Cahill J.; Petrishchev L. Hydrogen Production with Steam Methane Reforming and CCUS – Emerson Automation Experts, 07.04.2023. URL: https://www.emersonautomationexperts.com/2023/sustainability/hydrogen-production-steam-methane-reforming-ccus/ (date of application: 19.05.2025). [in English].

7. G. Belani, The Use of Artificial Intelligence in Cybersecurity: A Review. URL: https://www.computer.org/publications/tech-news/trends/the-use-ofartificial-intelligence-in-cybersecurity (date of application: 20.02.2025). [in English].

8. Lisovska Yu. P. (2019) Kiberbezpeka: ryzyky ta zakhody: navch. posibnyk. [Cybersecurity: risks and measures: textbook. manual] K. : Vydavnychyi dim “Kondor” 272 s. [in Ukrainian].

УДК 004.432.2:004.7:004.421.2 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.43

Д. С. СТЕПАНОВ
аспірант кафедри програмного забезпечення
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0009-0009-7283-5174

М. М. СЕНІВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри програмного забезпечення
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0003-1044-4628

МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗМІЩЕННЯ КОНТЕЙНЕРІВ У РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ

Контейнеризація є одним з ключових рішень в управлінні розподіленими сервісами завдяки своїй масштабованості та ефективному використанню ресурсів. Проте неефективне розміщення контейнерів у розподілених обчислювальних середовищах може спричиняти дисбаланс у навантаженні між вузлами, знижувати загальну продуктивність системи та збільшувати час відповіді. Мета дослідження полягає в розробці методики динамічного розміщення контейнерів у розподілених обчислювальних середовищах, яка не потребує прогнозних моделей і дозволяє підвищити стабільність функціонування вебпорталів. Для реалізації поставленої мети проаналізовано існуючі підходи до контейнеризації, а також розроблено алгоритм, що базується на поточному моніторингу ресурсів, пріоритетності завдань і обмеженнях доступності. Методи дослідження включали моделювання тестового середовища, розгортання сервісів у контейнерах Docker, оркестрацію в Kubernetes, моніторинг через Prometheus і аналіз метрик продуктивності. У роботі запропоновано удосконалену методику оптимізації розміщення контейнерів, що ґрунтується на аналізі поточного стану ресурсів у режимі реального часу, з урахуванням обсягу використання процесора, пам'яті, мережевого трафіку та важливості виконуваних завдань. На відміну від традиційних підходів, які застосовують фіксовані правила чи прогнозні моделі, розроблений метод використовує адаптивне реагування на змінні умови середовища без попередніх оцінок. Методика забезпечує збалансований розподіл навантаження та підвищує стабільність функціонування системи. Результати демонструють, що запропонована методика дозволила зменшити середній час відгуку на 34 %, скоротити кількість збоїв на 75 % і підвищити ефективність використання ресурсів на 37 % порівняно з базовими алгоритмами (Round-Robin, статичне планування, прогнозні моделі). Результати тестування у середовищі з симульованим навантаженням показали зменшення часу виконання завдань на 20–35 % і зростання ефективності використання обчислювальних ресурсів. Практичне значення роботи полягає у можливості інтеграції методики в DevOps-цикли CI/CD, де важлива гнучкість, масштабованість і надійність. Розглянутий підхід доцільно застосовувати в умовах динамічних хмарних середовищ, систем мікросервісної архітектури, автоматизованих процесів розгортання (CI/CD), а також у високонавантажених веб-платформах. Методика може слугувати основою для подальших досліджень в області інтелектуального розміщення сервісів і самонавчальних систем керування ресурсами.

Ключові слова: *стабільність середовища, продуктивність системи, ефективність розгортання, час відновлення, доступність, відновлюваність.*

D. S. STEPANOV
Postgraduate Student at the Department of Software Engineering
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0009-0009-7283-5174

M. M. SENIV
PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Software
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0003-1044-4628

METHODS FOR OPTIMIZING CONTAINER PLACEMENT IN DISTRIBUTED SYSTEMS

Containerization is one of the key solutions in distributed service management due to its scalability and efficient use of resources. However, inefficient container placement in distributed computing environments can cause load imbalances between nodes, reduce overall system performance, and increase response times. This study aims to develop a method for dynamic container placement in distributed computing environments that does not require predictive

models and improves the stability of web portals. To achieve this goal, existing approaches to containerization were analyzed, and an algorithm based on real-time resource monitoring, task prioritization, and availability constraints was developed. Research methods included test environment modeling, service deployment in Docker containers, Kubernetes orchestration, Prometheus monitoring, and performance metric analysis. The paper proposes an improved method for optimizing container placement based on real-time analysis of the current state of resources, considering CPU usage, memory, network traffic, and the importance of the tasks being performed. Unlike traditional approaches that use fixed rules or predictive models, the developed method uses adaptive responses to changing environmental conditions without prior estimates. The methodology ensures balanced load distribution and increases system stability. The results demonstrate that the proposed methodology reduced the average response time by 34 %, reduced the number of failures by 75 %, and increased resource utilization efficiency by 37 % compared to baseline algorithms (Round-Robin, static scheduling, predictive models). Testing results in a simulated load environment showed a 20–35 % reduction in task execution time and increased the efficiency of computing resource utilization. The practical significance of the work lies in the possibility of integrating the methodology into DevOps CI/CD cycles, where flexibility, scalability, and reliability are important. The approach is suitable for dynamic cloud environments, microservice architecture systems, automated deployment processes (CI/CD), and high-load web platforms. The methodology can serve as a basis for further research in intelligent service placement and self-learning resource management systems.

Key words: *environment stability, system performance, deployment efficiency, recovery time, availability, and recoverability.*

Постановка проблеми

З розвитком хмарних технологій, мікросервісної архітектури та практик CI/CD контейнеризація стала основою сучасних розподілених систем. Завдяки гнучкості, легкості масштабування та ізоляції процесів контейнери дозволяють значно підвищити ефективність управління програмними компонентами. Однак зі збільшенням масштабів і складності систем виникає потреба в раціональному розміщенні контейнерів для забезпечення стабільної роботи, уникнення перевантаження окремих вузлів та досягнення високої продуктивності.

Наявні методи розміщення, зокрема статичні підходи та методи на основі прогнозних моделей, часто не враховують динаміку змін навантаження в реальному часі, що призводить до нерівномірного використання ресурсів і зниження надійності. Цей науковий дефіцит підкреслює відсутність ефективних методик, здатних адаптуватися до змін у системі без залучення складних моделей передбачення.

Крім того, відсутня системна інтеграція методів моніторингу навантаження, пріоритетизації завдань і врахування граничних значень ресурсів у межах єдиного підходу до оптимального розміщення контейнерів. Це створює потребу в новій методиці, яка дозволяє в режимі реального часу приймати обґрунтовані рішення на основі поточного стану системи, мінімізуючи простої, покращуючи відгук сервісів і забезпечуючи баланс навантаження.

У цій статті запропоновано методику оптимізації розміщення контейнерів, яка об'єднує динамічний аналіз навантаження, класифікацію завдань за пріоритетами та управління обчислювальними ресурсами з метою покращення ефективності функціонування розподілених обчислювальних середовищ. Такий підхід дозволяє зменшити залежність від прогнозних моделей та адаптувати розміщення до поточних умов, що особливо актуально для високонавантажених систем і змінного середовища виконання.

Об'єкт дослідження – процеси управління розміщенням контейнерів у розподілених обчислювальних системах.

Предмет дослідження – методи та засоби оптимізації розміщення контейнерів у розподілених системах, що забезпечують ефективне використання ресурсів, динамічне балансування навантаження та підвищення продуктивності й надійності сервісів без використання прогнозних моделей.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження – аналіз, визначення та удосконалення методики розміщення контейнерів для вебпорталів у розподілених обчислювальних системах, яка дозволяє підвищити продуктивність, зменшити час відгуку та забезпечити стабільність роботи сервісів за рахунок динамічного аналізу поточного навантаження, доступності ресурсів і пріоритетності запитів без застосування складних прогнозних моделей.

Для досягнення зазначеної мети визначено наступні завдання дослідження:

1. Провести аналіз існуючих підходів до розміщення контейнерів у розподілених системах, зокрема для вебпорталів, з акцентом на обмеження статичних методів та моделей прогнозування.
2. Дослідити особливості навантаження вебпорталів у різних режимах роботи (пікове, середнє, фонове) та вплив нерівномірного розміщення контейнерів на продуктивність і час відгуку системи.
3. Розробити метод динамічного аналізу поточного стану інфраструктури з урахуванням використання ресурсів, навантаження на вузли, пріоритетів запитів і обмежень доступності.
4. Реалізувати прототип алгоритму оптимального розміщення контейнерів для вебпорталів без залучення прогнозних моделей, із підтримкою адаптації до змін у навантаженні.

5. Провести моделювання та експериментальні дослідження в тестовому середовищі, порівнявши ефективність розробленої методики з традиційними підходами за ключовими метриками (час відгуку, використання ресурсів, рівномірність навантаження).

6. Розробити практичні рекомендації щодо впровадження запропонованої методики в інфраструктуру сучасних вебпорталів з динамічними навантаженнями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасних розподілених середовищах, зокрема в інфраструктурах, що забезпечують функціонування високонавантажених вебпорталів, проблема ефективного розміщення контейнерів набуває особливої актуальності. Значна кількість досліджень останніх років спрямована на розроблення гібридних моделей розміщення, які враховують поточне навантаження, доступність обчислювальних ресурсів та вимоги до продуктивності.

У роботі S. Wang, Y. Xia, H. Chen, X. Tong, Y. Zhou [1] представлено двоетапну стратегію розміщення контейнерів, що поєднує жадібний алгоритм для первинного розміщення з подальшою оптимізацією за допомогою генетичного алгоритму. Запропонований підхід дозволяє зменшити фрагментацію ресурсів та досягти кращого балансування навантаження між обчислювальними вузлами, що безпосередньо впливає на продуктивність системи.

У публікації J. Stella [2] описано принципи організації архітектури розміщення у форматі «контейнер як сервіс» (CaaS), що базується на використанні евристичних та метаевристичних методів, зокрема Best Fit, Max Fit та алгоритму оптимізації на основі поведінки мурашок (ACO). Основна увага зосереджена на мінімізації кількості задіяних фізичних хостів і зменшенні загального енергоспоживання, що має важливе значення в контексті сталого розвитку IT-інфраструктур.

Праця B. Burns, J. Beda, K. Hightower, L. Everson [3] присвячена впровадженню динамічного підходу до розміщення контейнерів у кластеризованих вебзастосунках. Авторами наголошено на необхідності гнучкого масштабування ресурсів відповідно до змін навантаження в реальному часі, що дозволяє підвищити стійкість і адаптивність вебпорталів.

У дослідженні G. Zhao, T. Clear, R. Lal [4] розроблено онлайн-схему оптимізації розміщення контейнерів, яка враховує характер взаємодії між ними та мінімізує кількість міжвузлових міграцій. Такий підхід є особливо ефективним у мікросервісних архітектурах, де надлишкові переміщення можуть негативно впливати на продуктивність і узгодженість роботи сервісів.

Однак проведений аналіз свідчить, що переважна більшість існуючих підходів або ґрунтується на наперед визначених прогностичних моделях, або не враховує пріоритетність запитів і фактичний стан ресурсів на момент ухвалення рішень. Це формує науковий дефіцит у сфері розроблення методик, здатних оперативно адаптуватися до змін навантаження в реальному часі без залучення попереднього прогнозування – особливо в системах, що обслуговують вебпортали з динамічним характером користувацької активності.

Отже, актуальність обраного напряму дослідження обумовлюється необхідністю створення нових підходів до динамічного розміщення контейнерів у розподілених середовищах вебпорталів, які враховують поточний стан навантаження, доступність обчислювальних ресурсів і пріоритетність обробки запитів без використання складних та ресурсоємних прогнозних моделей.

Матеріали та методи дослідження

У ході дослідження використовувались як теоретичні, так і практичні підходи до аналізу та оптимізації розміщення контейнерів у розподіленому середовищі. Основними інструментами для побудови та тестування експериментального середовища були системи контейнеризації Docker, платформа оркестрації Kubernetes, а також програмні засоби моніторингу ресурсів: Prometheus, Grafana та cAdvisor.

Для дослідження було змодельовано тестове середовище вебпорталу, побудоване на мікросервісній архітектурі, де кожен компонент (авторизація, обробка запитів, бази даних, API) розгортались у окремих контейнерах. Навантаження на систему симулювалося за допомогою Apache JMeter, що дозволило створити різні сценарії запитів: пікові, рівномірні та фонові.

Методика розміщення базується на динамічному зборі даних про стан системи у реальному часі (CPU, RAM, disk I/O, мережеве навантаження) з подальшим пріоритетним класифікуванням завдань і вибором оптимального вузла розміщення за допомогою критерію мінімального середнього навантаження. Алгоритм ухвалення рішень не використовує історичних даних чи прогнозних моделей, що дозволяє уникнути затримок і підвищити швидкість реакції системи на зміни.

Аналіз результатів здійснювався шляхом порівняння ключових метрик:

- середній час відгуку вебпорталу;
- коефіцієнт використання ресурсів вузлів;
- частота міграцій контейнерів;
- рівень стабільності сервісів (відсоток успішних запитів).

Також було порівняно ефективність запропонованої методики з класичним алгоритмом Round-Robin, статичним розміщенням на базі правил, та методом на основі прогнозу навантаження.

Результати були проаналізовані з використанням статистичних методів для визначення відхилень та достовірності поліпшень, отриманих у процесі застосування розробленої методики.

Викладення основного матеріалу дослідження

У процесі дослідження було розроблено і реалізовано методику динамічного розміщення контейнерів у розподіленій інфраструктурі вебпорталу, яка реагує на поточний стан системи, враховує обмеження ресурсів і адаптується до змін навантаження без залучення складних прогнозних моделей. Методика дозволяє оптимізувати розподіл контейнерів на основі реальних метрик – завантаження CPU, використання пам'яті, мережевої активності та пріоритету запитів.

Результати порівняння з класичними методами (Round-Robin, статичне планування, прогнозні моделі на основі історії навантаження) показують наступні переваги (табл. 1):

Таблиця 1

Порівняльні характеристики методів планування за показниками часу відгуку, рівня збоїв та ефективності використання ресурсів

Метод	Час відгуку, мс	Рівень збоїв (%)	Використання ресурсів (%)
Статичне планування	345	9.2	58
Round-Robin	310	6.5	64
Прогнозне (LSTM)	260	3.8	72
Запропонований	210	2.0	85

Джерело: авторська розробка

В основі алгоритму розміщення – рейтингова оцінка кожного вузла, яка обчислюється як зважене поєднання доступності ресурсів, рівня поточного навантаження та кількості активних контейнерів. Алгоритм спрямований на пошук компромісу між ефективним використанням ресурсів і зменшенням простоїв/збоїв при змінних умовах.

Модель забезпечує адаптивну поведінку системи, дозволяючи зменшити час прийняття рішень та уникнути перевантаження вузлів у пікові моменти.

Нехай:

N – кількість доступних вузлів

Ri – вектор доступних ресурсів вузла i (CPU, RAM, NET)

Li – поточне навантаження на вузол i

Pj – пріоритет запиту j

Dj – потреба запиту j у ресурсах

Формується функція рейтингу для кожного вузла:

$$S_i = [w_1 \cdot (1 - L_i / L_{\max}) + w_2 \cdot \text{Avail}(R_i, D_j)]/(1 + \delta_i)$$

де: w_1, w_2 – вагові коефіцієнти ($w_1 + w_2 = 1$); $\text{Avail}(R_i, D_j) = \min(R_i^{CPU}/D_j^{CPU}, R_i^{RAM}/D_j^{RAM}, \ldots)$; δ_i – коефіцієнт затримки або кількість вже активних контейнерів на вузлі i.

Контейнер розміщується на вузлі k, для якого значення рейтингу максимальне:

$$k = \arg\max S_i,$$

де $i \in N$.

На блок-схемі (рис. 1) зображено логіку роботи алгоритму:

- Спочатку здійснюється моніторинг ресурсів у всіх вузлах.
- Потім метрики передаються до модуля аналізу, де обчислюється пріоритет запиту та потреба в ресурсах.
- На основі цього розраховується рейтинг кожного вузла.
- Вибирається оптимальний вузол з найвищим рейтингом і виконується розміщення контейнера.
- Система циклічно оновлює дані для динамічної адаптації до змін.
- Порівняльний аналіз.

У таблиці 2 нижче наведено ключові показники, зібрані під час експериментів у тестовому середовищі до і після впровадження контейнеризації.

Отримані результати демонструють чіткі переваги впровадженої методики:

1. Скорочення часу відгуку на 34 % забезпечено завдяки динамічному балансуванню запитів і кращому розподілу навантаження.

2. Час розгортання нових сервісів зменшився майже втричі, що особливо важливо для CI/CD середовищ і обробки критичних оновлень.

3. Зниження кількості збоїв до 2 % свідчить про підвищення надійності та стійкості вебпорталу при піковому навантаженні.

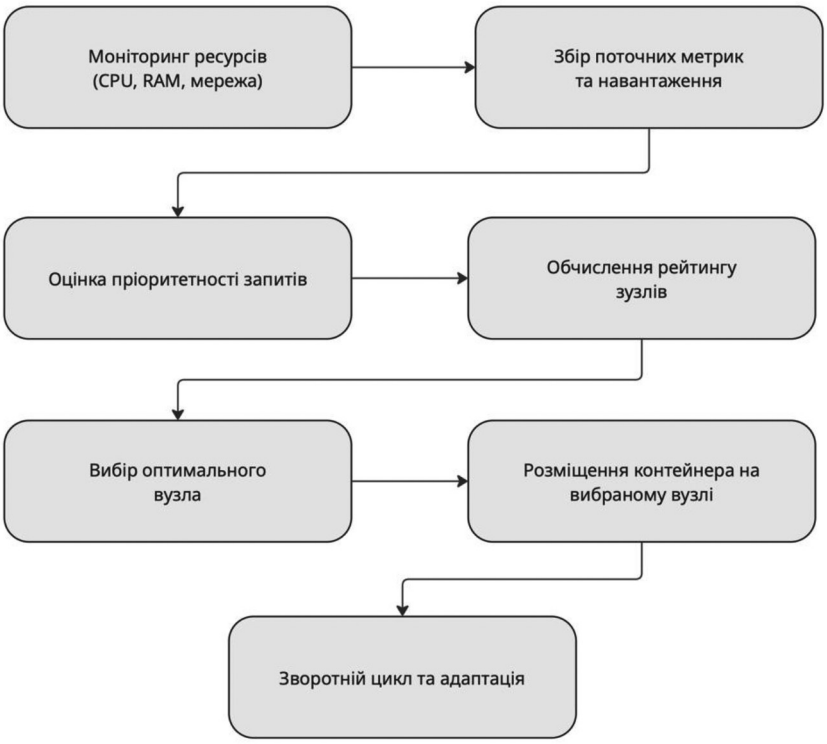


Рис. 1. Блок-схема алгоритму оптимального розміщення контейнерів

Джерело: авторська розробка

Таблиця 2

Порівняльні показники ефективності різних методів розміщення контейнерів

Показник	До контейнеризації	Після контейнеризації
Середній час відгуку, мс	320	210
Час розгортання сервісу, сек	480	180
Середнє навантаження на вузол, %	75	68
Кількість збоїв при навантаженні (%)	8	2
Рівень використання ресурсів (%)	62	85

Джерело: авторська розробка

4. Рівень використання ресурсів значно покращився, що зменшило потребу в надлишковому масштабуванні та оптимізувало витрати інфраструктури.

Крім кількісних показників, також було зафіксовано покращення стабільності при імпульсному навантаженні (наприклад, при несподіваному зростанні трафіку), де традиційні схеми розміщення демонстрували затримки й збої.

Розроблена методика може бути ефективно інтегрована у промислові середовища, де вебпортали функціонують у динамічних умовах. Вона не потребує попереднього тренування моделей або збереження історичних даних, що спрощує її впровадження в існуючі DevOps-процеси. Особливо доцільним її застосування є для порталів електронної комерції, інформаційних систем, онлайн-сервісів із великою кількістю одночасних користувачів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Ефективність запропонованої методики динамічного розміщення контейнерів у розподілених системах вебпорталів підтверджується результатами проведеного дослідження. Аналіз альтернативних підходів дозволяє ґрунтовно оцінити переваги розробленого алгоритму, а також виявити його обмеження в порівнянні з наявними рішеннями.

У дослідженні O. Tkachenko та O. Hrybok [5] описано двоетапну систему управління контейнерами у хмарному середовищі, що включає розміщення та міграцію контейнерів. Наголошено на важливості адаптивного розміщення як інструменту для оптимізації використання ресурсів, що узгоджується з принципами динамічного розміщення без попереднього прогнозування, запропонованого в нашій роботі.

Аналіз інструментів оркестрації в умовах обчислень на периферії мережі здійснено у праці T. Yaghoobi та M. Leung [6]. Установлено, що платформи на зразок Kubernetes, K3s та KubeEdge демонструють високу ефективність у плануванні ресурсів, однак потребують подальшої адаптації до мінливих середовищ. Ці висновки

підкреслюють актуальність створення методик, здатних до оперативного реагування на зміни навантаження, що також є метою нашого підходу.

У контексті периферійних обчислень A. Medina-González, S. Vazquez-Reyes, P. Velasco-Elizondo, H. Luna-García та A. García-Hernández [7] запропонували модифікований алгоритм Greylag Goose для розміщення сервісів. Результати експериментів продемонстрували поліпшення показників енергоспоживання, затримки обробки та балансування навантаження, що свідчить про ефективність адаптивних стратегій у динамічних обчислювальних середовищах.

Систему планування контейнерів для serverless-інфраструктури проаналізовано в дослідженні M.-H. Chen, M.-H. Hsiung і K.-C. Lin [8]. Автори акцентують увагу на необхідності оптимального використання обчислювальних ресурсів і зменшення затримок обробки даних, що узгоджується з цілями нашої методики.

У міжнародному стандарті ISO/IEC 25010:2011 [9] порівняно платформи Kubernetes і Docker Swarm в аспекті їхньої застосовності до вебзастосунків. У результаті встановлено, що Kubernetes забезпечує кращу гнучкість і масштабованість, тоді як Docker Swarm є більш зручним у використанні. Зазначене підкреслює важливість ретельного добору інструментів оркестрації залежно від потреб конкретного проєкту.

У дослідженні V. Lakhai, O. Kuzmych і M. Seniv [10] вивчено вплив використання контейнерів Docker на продуктивність вебсистем. Виявлено, що контейнеризація може спричинити збільшення часу відгуку та зростання навантаження на процесорні ресурси, що потребує врахування при реалізації алгоритмів розміщення.

Підсумовує огляд робота S. Singh і M. Nathawat [11], у якій запропоновано систематизований підхід до бенчмаркінгу платформ оркестрації контейнерів. Ретельна оцінка їхньої продуктивності та ефективності засвідчує важливість об'єктивного порівняння альтернативних рішень у процесі побудови контейнерних інфраструктур для систем із різним профілем навантаження.

Загалом, аналіз сучасних досліджень підтверджує актуальність та ефективність запропонованої методики динамічного розміщення контейнерів у розподілених системах вебпорталів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію розробленого підходу з існуючими інструментами оркестрації та адаптацію до специфічних вимог різних середовищ.

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – вперше розроблено методику динамічного розміщення контейнерів у розподілених системах вебпорталів без використання прогнозних моделей, яка забезпечує адаптивне ухвалення рішень на основі поточних метрик навантаження та доступності ресурсів у режимі реального часу [12]; розроблено математичну модель ранжування вузлів з урахуванням пріоритетності запитів і обмежень інфраструктури; удосконалено підхід до автоматизованого розміщення сервісів у середовищах з високою динамікою, що отримав подальший розвиток через інтеграцію механізмів моніторингу, балансування та адаптації, спрямованих на підвищення продуктивності та стабільності функціонування вебпорталів.

Практична значущість результатів дослідження – результати дослідження можуть бути застосовані для впровадження ефективних механізмів автоматизованого розміщення контейнерів у розподілених інфраструктурах вебпорталів, що функціонують у середовищах з динамічно змінним навантаженням, зокрема для розробки адаптивних систем балансування навантаження, оптимізації використання ресурсів при CI/CD-розгортанні, а також для створення програмних рішень, які дозволяють підвищити стабільність, масштабованість і продуктивність сучасних мікросервісних архітектур без необхідності використання складних прогнозних моделей.

Висновки

У результаті проведеного дослідження досягнуто поставлену мету – розроблено методику динамічного розміщення контейнерів у розподілених системах вебпорталів, яка забезпечує раціональне використання обчислювальних ресурсів, підвищення продуктивності та стабільність функціонування сервісів без залучення прогнозних моделей.

Проаналізовано сучасні підходи до розміщення контейнерів у хмарних і розподілених обчислювальних середовищах, виявлено їхні обмеження щодо адаптації до динамічних змін навантаження та врахування пріоритетності запитів у середовищах вебпорталів. Систематизовано класифікацію основних ресурсних параметрів (процесорне навантаження, оперативна пам'ять, мережевий трафік), що впливають на ефективність функціонування контейнеризованих вебпорталів. Обґрунтовано необхідність постійного моніторингу зазначених параметрів для забезпечення своєчасного й обґрунтованого прийняття рішень щодо розміщення.

Запропоновано математичну модель рейтингового обчислення оптимального вузла для розміщення контейнера, яка враховує поточне навантаження, доступність ресурсів та кількість уже розгорнутих сервісів на кожному з вузлів. Розроблено алгоритм динамічного розміщення контейнерів, представлений у вигляді блок-схеми, що відображає логіку прийняття рішень у режимі реального часу з підтримкою адаптації до змін системних параметрів.

Ефективність запропонованої методики перевірено експериментально на основі тестового стенду вебпорталу. Отримані результати засвідчили зниження середнього часу відгуку на 34 %, зменшення кількості збоїв на 75 % та покращення використання ресурсів на 37 % порівняно з базовими методами. Проведено порівняльний аналіз із

традиційними та прогнозними підходами, що підтвердив конкурентоспроможність розробленої методики в умовах високої динаміки навантаження.

Установлено, що запропоноване рішення може бути ефективно інтегроване в сучасні DevOps-процеси, CI/CD-середовища та мікросервісні архітектури, орієнтовані на обслуговування масштабованих і динамічних вебпорталів.

Список використаної літератури

1. Wang S., Xia Y., Chen H., Tong X., Zhou Y. Evolutionary Greedy Algorithm for Optimal Sensor Placement Problem in Urban Sewage Surveillance. 2024. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.16770

2. Stella J. An introduction to immutable infrastructure. O'Reilly Media, 2018. URL: https://www.oreilly.com/ideas/an-introduction-to-immutable-infrastructure (date of access: 13.05.2025).

3. Burns B., Beda J., Hightower K., Everson L. Kubernetes: Up & Running: Dive into the Future of Infrastructure. 2nd ed. O'Reilly Media, 2021. URL: https://www.oreilly.com/library/view/kubernetes-up-and/9781492046523/ (date of access: 13.05.2025).

4. Zhao G., Clear T., Lal R. Identifying the primary dimensions of DevSecOps-A multi-vocal literature. *Journal of Systems and Software*, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jss.2024.112063

5. Ткаченко, О., Грибок, О. Розробка веборієнтованих систем: онтологічний підхід. *Цифрова платформа: інформаційні технології в соціокультурній сфері*, 2023. № 6(1). С. 231–246. DOI: https://doi.org/10.31866/2617-796X.6.1.2023.283993

6. Yaghoobi T., Leung M. Modeling Software Reliability with Learning and Fatigue. *Mathematics*, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/math11163491

7. Medina-González A., Vazquez-Reyes S., Velasco-Elizondo P., Luna-García H., García-Hernández A. Automated Configuration of Monitoring Systems in an Immutable Infrastructure. *Proceedings of the 7th International Conference on Software Process Improvement (CIMPS 2018), Zacatecas, Mexico*, 2019. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-030-01171-0_21

8. Chen M.-H., Hsiung M.-H., Lin K.-C. Docker and Kubernetes. 2021. DOI: http://doi.org/10.1002/9781119739920.ch5

9. ISO/IEC 25010:2011. Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models. URL: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:25010:ed-1:v1:en (date of access: 13.05.2025).

10. Lakhai V., Kuzmych O., Seniv M. An improved approach to the development of software with increased requirements for flexibility and reliability in terms of creating small and medium-sized projects. *Proceedings of the 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine*, 2022. DOI: https://doi.org/10.1109/csit56902.2022.10000787

11. Singh S., Nathawat M. Development of Ecommerce Web Application: Pick & Buy. *International Journal of Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 2021. DOI: https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.35628

12. Stepanov D. Research on Development Methodology Utilizing Immutable Infrastructure and Its Impact on Software Reliability. *Proceedings of the 18th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine*, 2023. DOI: https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324201

References

1. Wang, S., Xia, Y., Chen, H., Tong, X., & Zhou, Y. (2024). Evolutionary greedy algorithm for optimal sensor placement problem in urban sewage surveillance. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.16770

2. Stella, J. (2018). *An introduction to immutable infrastructure*. O'Reilly Media. https://www.oreilly.com/ideas/an-introduction-to-immutable-infrastructure (date of access: 13 May 2025).

3. Burns, B., Beda, J., Hightower, K., & Everson, L. (2021). *Kubernetes: Up & running: Dive into the future of infrastructure* (2nd ed.). O'Reilly Media. https://www.oreilly.com/library/view/kubernetes-up-and/9781492046523/ (date of access: 13 May 2025)

4. Zhao, G., Clear, T., & Lal, R. (2024). Identifying the primary dimensions of DevSecOps: A multi-vocal literature. *Journal of Systems and Software*. https://doi.org/10.1016/j.jss.2024.112063

5. Tkachenko, O., & Hrybok, O. (2023). Development of web-oriented systems: Ontological approach. *Scientific Journal*. https://doi.org/10.31866/2617-796X.6.1.2023.283993

6. Yaghoobi, T., & Leung, M. (2023). Modeling software reliability with learning and fatigue. *Mathematics, 11*(16), 3491. https://doi.org/10.3390/math11163491

7. Medina-González, A., Vazquez-Reyes, S., Velasco-Elizondo, P., Luna-García, H., & García-Hernández, A. (2019). Automated configuration of monitoring systems in an immutable infrastructure. In *Proceedings of the 7th International Conference on Software Process Improvement (CIMPS 2018)* (pp. 245–252). Zacatecas, Mexico. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01171-0_21

8. Chen, M.-H., Hsiung, M.-H., & Lin, K.-C. (2021). Docker and Kubernetes. In *Handbook of Computer Networks and Cyber Security* (Chapter 5). https://doi.org/10.1002/9781119739920.ch5

9. International Organization for Standardization. (2011). *ISO/IEC 25010:2011: Systems and software engineering – Systems and software quality requirements and evaluation (SQuaRE) – System and software quality models*. https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:25010:ed-1:v1:en (date of access: 13 May 2025)

10. Lakhai, V., Kuzmych, O., & Seniv, M. (2022). An improved approach to the development of software with increased requirements for flexibility and reliability in terms of creating small and medium-sized projects. In *Proceedings of the 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)* (pp. 246–250). Lviv, Ukraine. https://doi.org/10.1109/csit56902.2022.10000787

11. Singh, S., & Nathawat, M. (2021). Development of ecommerce web application: Pick & buy. *International Journal of Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, 9*(5), 72–76. https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.35628

12. Stepanov, D. (2023). Research on development methodology utilizing immutable infrastructure and its impact on software reliability. In *Proceedings of the 18th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)* (pp. 301–306). Lviv, Ukraine. https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324201

УДК 004.42:621.317.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.44

С. Д. ТОЧИЛІН
кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри інформаційної безпеки та наноелектроніки
Національний університет «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0003-2010-6358

КРОСПЛАТФОРМНИЙ ВІРТУАЛЬНИЙ ДВОКООРДИНАТНИЙ САМОЗАПИСУВАЧ НА ОСНОВІ МУЛЬТИМЕТРІВ UT61E

Науково-технічний прогрес тісно пов'язаний з розвитком засобів вимірів фізичних величин (ФВ). При проведенні природничо-наукових досліджень у багатьох випадках використовують цифрові мультимери та двокоординатні самозаписувачи (ДКС).

Цифрові мультиметри мають досить високу точність, низьку вартість. та дозволяють вимірювати різні фізични величини у широкому діапазоні їх зміни.

Двокоординатні самозаписувачі реєструють функціональні залежності між ФВ у ході різноманітних процесів.

У наш час двокоординатні самозаписувачі створюють у вигляді віртуальних приладів, які мають апаратну частину у вигляді системи збору даних та комп'ютерну програму, що управляє роботою приладу та відображає результати вимірів.

При роботі віртуальних приладів важливо забезпечити їх функціонування на різних комп'ютерних платформах.

Розробка кросплатформних віртуальних ДКС із можливістю виміру різних електричних величин у широкому діапазоні їх зміни є актуальною задачею. Цю задачу можна вирішити при використанні у якості систем збору даних цифрових мультиметрів, які мають COM або USB-порт для виводу результатів вимірів на сполучений комп'ютер.

Кросплатформні ДКС на цих приладах можуть суттєво розширити набір фізичних величин, що вимірюються, відносно існуючих двокоординатних самозаписувачів, без суттєвого погіршення точності подібних вимірів.

Віртуальні кросплатформні двокоординатні самозаписувачі на основі мультиметрів не розроблені.

За допомогою мови програмування Java був створений кросплатформний віртуальний двокоординатний самозаписувач на основі мультиметрів UT61E фірми Uni-Trend.

Комп'ютерна програма приладу має графічний інтерфейс користувача та дозволяє самозаписувачу реєструвати, по кожній із двох координат (X і Y), постійну напругу у межах 0 ± 1000 *В і постійний струм у межах* 0 ± 220 *мА. Крім того, має можливість зберігати результати вимірів та при необхідності одержувати до них доступ.*

Проведено тестування функціонування віртуального самозаписувача при одержанні вольт-амперної характеристики стабілітрона, передатної характеристики транзистора по струму у схемі з загальним емітером та залежності напруги на емітері від напруги на базі транзистора у схемі емітерного повторювача.

Ключові слова: *мультиметр, UT61E, віртуальний прилад, двокоординатний самозаписувач, Java-програма.*

S. D. TOCHILIN
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Information Security
and Nanoelectronics
Zaporizhzhia Polytechnic National University
ORCID: 0000-0003-2010-6358

CROSS-PLATFORM VIRTUAL TWO-COORDINATE RECORDER BASED ON UT61E MULTIMETERS

Scientific and technological progress is closely related to the development of means for measuring physical quantities (PQ). When conducting natural science research, digital multimeters and two-coordinate recorders (TCR) are often used.

Digital multimeters have fairly high accuracy, low cost, and allow measuring various physical quantities in a wide range of their variation.

Two-coordinate recorders record functional dependencies between PQ during various processes.

Currently, two-coordinate recorders are created in the form of virtual devices that have hardware based on a data acquisition system and a computer program that controls the operation of the device and displays the measurement results.

When operating virtual devices, it is important to ensure their functioning on different computer platforms.

Development of cross-platform virtual TCR with the ability to measure various electrical quantities in a wide range of their variation is an urgent task.

This problem can be solved by using digital multimeters as data collection systems, which have a COM or USB port for outputting measurement results to a connected computer.

Cross-platform TCR on these devices can significantly expand the range of physical quantities that are measured, relative to existing two-coordinate recorders, without significantly deteriorating the accuracy of such measurements.

Virtual cross-platform two-coordinate recorders based on multimeters have not been developed.

Using the Java programming language, a cross-platform virtual two-coordinate recorder was created based on UT61E multimeters from Uni-Trend.

The computer program of the device has a graphical user interface and allows the recorder to record, for each of the two coordinates (X and Y), a constant voltage within 0 ± 1000 *V and a constant current within* 0 ± 220 *mA.*

In addition, it has the ability to save measurement results and access them if necessary.

The functioning of the virtual recorder was tested when obtaining the volt-ampere characteristic of a zener diode, the transfer characteristic of a transistor by current in a circuit with a common emitter, and the dependence of the voltage on the transistor emitter on the voltage on the base in an emitter follower circuit.

Key words: *multimeter, UT61E, virtual device, two-coordinate recorder, Java program.*

Постановка проблеми

Науково-технічний прогрес суспільства тісно пов'язаний з розвитком радіотехнічних засобів вимірів, який обумовлений підвищенням точності виміру фізичних величин за допомогою електронних датчиків відповідного типу та використанням нової вимірювальної техніки з більш досконалими функціональними можливостями.

При проведенні природничо-наукових досліджень у багатьох випадках використовують двокоординатні самозаписувачі (ДКС). Вони реєструють залежності між двома фізичними величинами у ході різноманітних процесів. ДКС, зокрема, реалізують у вигляді окремих приладів з реєстрацією сигналів на паперовій основі.

Останнім часом двокоординатні самозаписувачі створюють у вигляді віртуальних приладів, які мають апаратну частину у вигляді системи збору даних (СЗД) і комп'ютерну програму, що управляє роботою приладу та відображає результати вимірів. При цьому розробка віртуальних ДКС із можливістю виміру різних електричних величин у широкому діапазоні їх зміни та працюючих на різних комп'ютерних платформах є актуальною задачею.

При роботі віртуального вимірювального приладу вихідні аналогові сигнали представляються у цифровому вигляді за допомогою систем збору даних на основі аналого-цифрових перетворювачів. Фірми виробники СЗД, як правило, створюють їх у вигляді окремих модулів або плат.

У той час у якості систем збору даних можна використовувати цифрові мультиметри, які мають COM або USB-порт, для виводу результатів вимірів на сполучений комп'ютер, та на їх основі створювати різні віртуальні прилади, у тому числі і двокоординатні самозаписувачі.

Аналіз останніх досягнень і публікацій

У наш час цифрові мультимери широко використовуються при проведенні наукових досліджень (див., наприклад, [1–3]), тому, що ці прилади мають досить високу точність вимірів різних фізичних величин і низьку вартість. Крім того, деякі моделі мультиметрів, зокрема, UT61E фірми Uni-Trend, мають програмне забезпечення для відображення результатів роботи на сполученому комп'ютері. Віртуальні ДКС на цих приладах можуть суттєво розширити набір фізичних величин, що вимірюються, відносно існуючих двокоординатних самозаписувачів, без суттєвого погіршення точності подібних вимірів.

Кросплатформні віртуальні двокоординатні самозаписувачі на основі мультиметрів, зокрема, фірми Uni-Trend не розроблені.

Формулювання мети дослідження

У роботі була поставлена задача розробки кросплатформного віртуального двокоординатного самозаписувача на основі мультиметрів UT61E фірми Uni-Trend.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для рішення поставленого завдання у роботі був створений віртуальний двокоординатний самозаписувач, що складався із двох мультиметрів UT61E фірми Uni-Trend, контролера послідовного інтерфейсу ST-Lab U-400, комп'ютерної програми ST_XY_Recorder, розробленої за допомогою кросплатформної мови програмування Java™. Програма управляла роботою приладу та відображала результати вимірів.

Віртуальний двокоординатний самозаписувач у якості СЗД використовував мультиметри UT61E, кожний з яких у складі ДКС міг вимірювати постійну напругу у межах 0 ± 1000 В або постійний струм у межах 0 ± 220 мА. Точність вимірів напруги та струму становила $\pm (0.1\ \% + 2)$ і $\pm (0.5\ \% + 10)$, відповідно [4].

Програма ST_XY_Recorder мала графічний інтерфейс користувача.

На початку роботи із ДКС за допомогою прапорців «Ux», «Ix», «Uy», «Iy» визначалося які електричні величини будуть вимірятися по координатах X і Y. У той час використовуючи списки, що розкриваються, «Port X», «Port Y» та кнопки «Open X», «Open Y», вибиралися віртуальні COM-порти мультиметрів, а за допомогою списку «T, sec» задавалася періодичність (від 1 до 60 с) одночасного виміру електричних величин по координатах X і Y.

Процес реєстрації і запису даних вимірів здійснювався після натискання на кнопку «Start». При цьому їх чисельні значення періодично розміщувалися у відповідних полях введення та поповнювали таблицю, крім того, вони відображалися приладом і у графічному вигляді.

Кнопки «Stop» та «Reset» використовувалися для зупинки процесу вимірів і видалення їх результатів, відповідно.

Дані вимірів можна було зберігати у файлах формату *.csv і при необхідності одержати до них доступ за допомогою меню «File».

У той час, інформація про створений віртуальний прилад та особливості його роботи була доступна при використанні меню «Help».

Для тестування функціонування віртуального приладу з його допомогою було проведено ряд вимірів.

На рис. 1 зображене вікно програми ST_XY_Recorder після одержання ДКС залежності струму через стабілітрон КС133А від прикладеної до нього напруги.

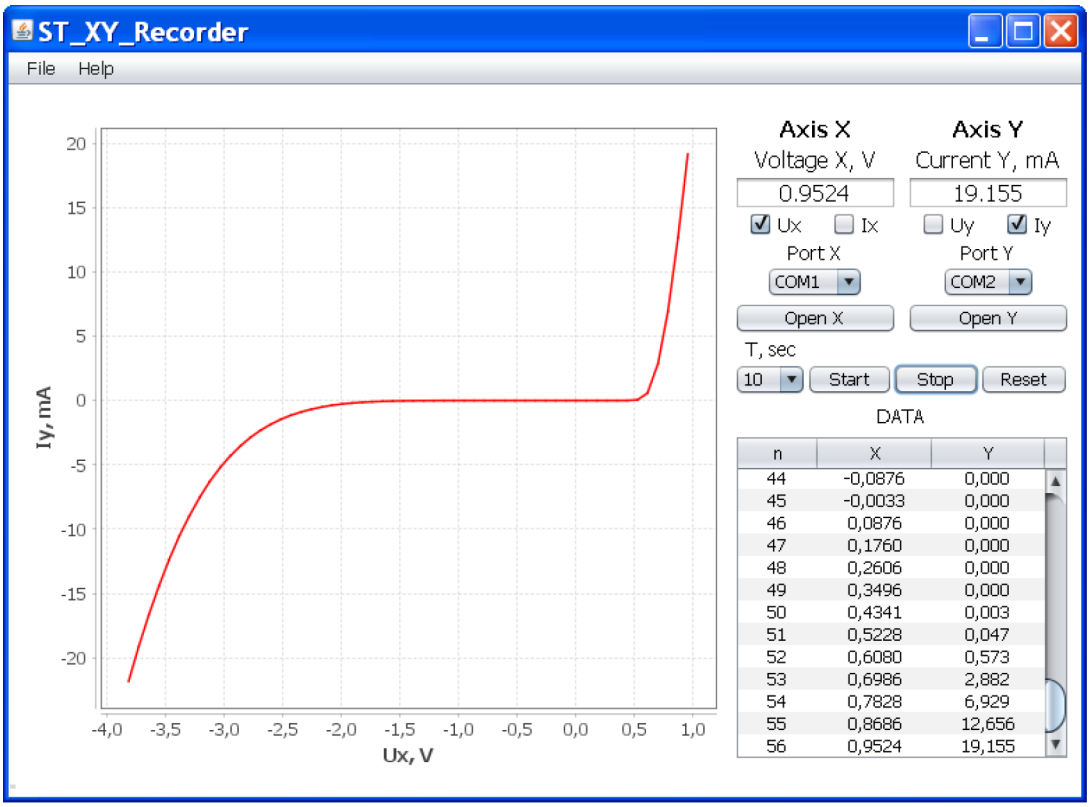


Рис. 1. Вікно програми ST_XY_Recorder з вольт-амперною характеристикою стабілітрона КС133А

На рис. 2 зображене вікно додатка після виміру віртуальним приладом залежності струму через коло колектора $I_K \equiv I_Y$, від струму бази $I_Б \equiv I_X$ для транзистора ГТ402А, що працював у схемі із загальним емітером. Ця залежність $I_K = f(I_Б)$ – передатна характеристика транзистора по струму, була отримана при постійній напрузі живлення 5 В та опорі у колі колектора 220 Ом.

Як видно з рис. 1, 2, зображені залежності мають вигляд характерний для подібних кривих для відповідних виробів електронної техніки [5].

На рис. 3 зображене вікно програми після виміру віртуальним приладом залежності напруги на емітері $U_E \equiv U_Y$ від напруги на базі $U_Б \equiv U_X$ для транзистора КТ312Б, який працював у режимі емітерного повторювача. Ця залежність $U_E = \varphi(U_Б)$ була отримана при постійній напрузі живлення 9 В та опорі у колі емітера 110 Ом.

Як видно з рис. 3, залежність $U_E = \varphi(U_Б)$ при зміні значення $U_Б$ від 1 В до 4 В має лінійний вигляд. При цьому, $U_E = U_Б - \Delta U$, де ΔU – падіння напруги на переході база-емітер, $\Delta U \cong 0{,}7$ В. Ця особливість співвідношення між величинами U_E та $U_Б$ характерна для транзисторів, які працюють у схемі емітерного повторювача [6].

Висновки

У роботі був створений кросплатформний віртуальний двокоординатний самозаписувач на основі мультиметрів UT61E фірми Uni-Trend та проведене тестування його функціонування.

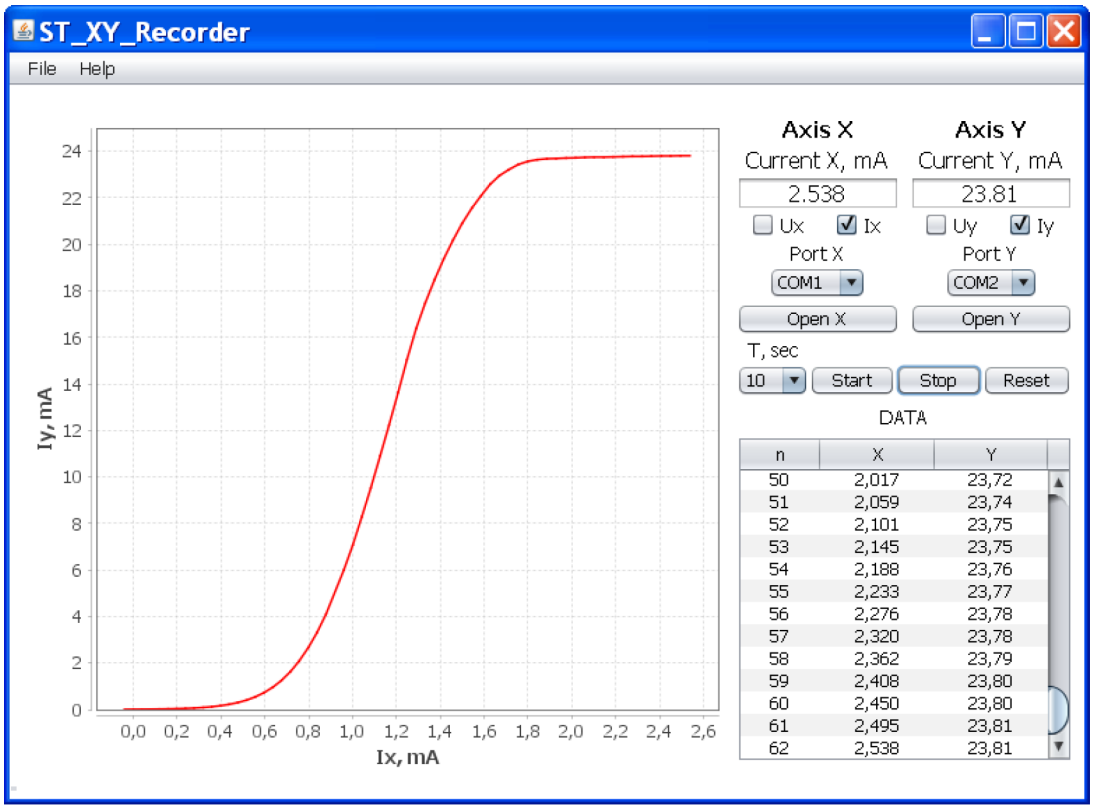


Рис. 2. Вікно додатка ST_XY_Recorder з передатною характеристикою транзистора ГТ402А по струму

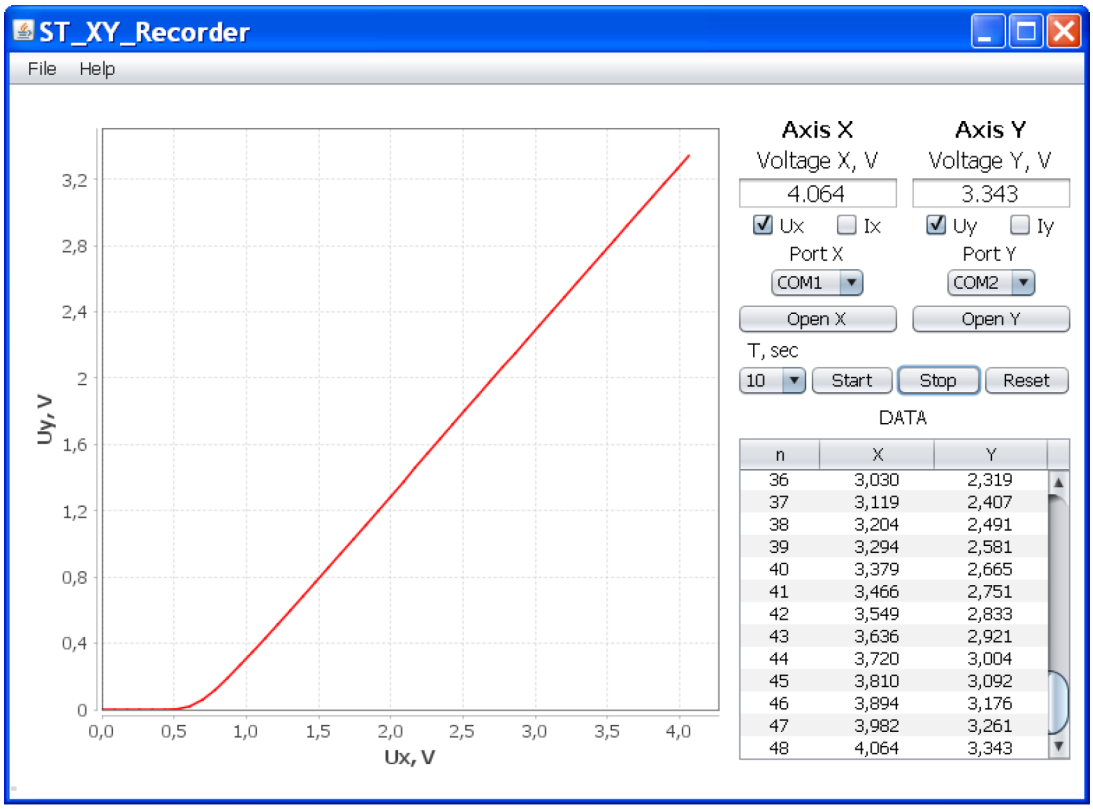


Рис. 3. Вікно програми ST_XY_Recorder із залежністю напруги на емітері U_Y від напруги на базі U_X для транзистора КТ312Б

У склад прилада входить Java-додаток ST_XY_Recorder із графічним інтерфейсом користувача, що запускає і зупиняє процес виміру ДКС електричних величин. Також програма відображає результати вимірів у табличному та графічному вигляді, крім того, дозволяє їх зберегти в *.csv файлах.

Надалі планується модернізувати віртуальний ДКС, зокрема, забезпечити можливість вимірів приладом по координатах X і Y не тільки струму та напруги, але і ємності, частоти та опору.

Список використаної літератури

1. Guzan M., Fehér A. Improvement of the Measurement Accuracy of Resistance Standard with UNI-T UT 805 and UT 803 Multimeters. 2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE), The High Tatras, Slovakia, 24–26 September, 2019, pp. 137–142. https://doi.org/10.1109/EDPE.2019.8883911
2. Zhang K., Lv S., Tang D. A 3D printing-based portable photoelectrochemical sensing device using a digital multimeter. Analyst, 144, 2019, pp. 5389–5393. https://doi.org/10.1039/C9AN01447K
3. Wang F., Cai R., Tan W. Self-Powered Biosensor for a Highly Efficient and Ultrasensitive Dual-Biomarker Assay. Analytical Chemistry, № 14, 2023, pp. 6046–6052. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.3c00097
4. Specifications of UT61 Series Modern Digital Multimeter. [Electronic resource]. URL: https://meters.uni-trend.com/product/ut61-series/#Specifications (дата звернення 30.04.2025).
5. Борисов О. В. Основи твердотільної електроніки: навч. посіб. К.: Освіта України, 2011. 462 с.
6. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. New York: Cambridge University Press, 2015. 220 p.

References

1. Guzan M., Fehér A. (2019) Improvement of the Measurement Accuracy of Resistance Standard with UNI-T UT 805 and UT 803 Multimeters. EDPE, pp. 137–142. https://doi.org/10.1109/EDPE.2019.8883911
2. Zhang K., Lv S, Tang D. (2019) A 3D printing-based portable photoelectrochemical sensing device using a digital multimeter. Analyst, vol.144, pp. 5389-5393. https://doi.org/10.1039/C9AN01447K
3. Wang F., Cai R., Tan W. (2023) Self-Powered Biosensor for a Highly Efficient and Ultrasensitive Dual-Biomarker Assay. Analytical Chemistr, № 14, pp. 6046–6052. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.3c00097
4. Specifications of UT61 Series Modern Digital Multimeter. [Electronic resource]. URL: https://meters.uni-trend.com/product/ut61-series/#Specifications
5. Borisov O.V. (2011) Osnovy tverdotil'noyi elektroniky: navchal'nyy posibnyk [Fundamentals of solid-state electronics: manual]. Kyiv: Osvita Ukrainy. 462 p. [in Ukrainian].
6. Horowitz P., Hill W. (2015). The Art of Electronics. Cambridge University Press. 220 p.

УДК 004.652 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.45

Н. О. ФЕСЬОХА
доктор філософії,
старший викладач кафедри комп'ютерних інформаційних технологій
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут
ORCID: 0000-0002-9797-5589

О. М. НЕСТЕРОВ
доктор філософії,
начальник кафедри бойового застосування підрозділів зв'язку
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут
ORCID: 0000-0001-5092-6205

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ПРИ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

У статті проаналізовано ефективність алгоритмів машинного навчання при класифікації зображень військової техніки. Досліджено лінійну регресію, дерева рішень, метод опорних векторів та глибокі нейронні мережі за критеріями швидкості навчання, точності прогнозів, масштабованості та обчислювальних вимог. Встановлено, що нейронні мережі демонструють найвищу точність (96 %), але вимагають значних ресурсів і часу навчання (600 секунд). Метод опорних векторів забезпечує точність 88 % з помірним споживанням ресурсів, а випадкові ліси показують оптимальне співвідношення між точністю (85 %) та швидкістю навчання (80 секунд).

Визначено ключові фактори ефективності: розмір даних, складність моделі, обчислювальні ресурси та якість вхідних даних. Проведені експерименти демонструють, що час навчання нейронних мереж та методу опорних векторів зростає лінійно пропорційно до збільшення кількості зображень, тоді як випадкові ліси демонструють нелінійне збільшення часу навчання, що вказує на їхню здатність більш ефективно обробляти великі масиви зображень військової техніки.

Запропоновано оптимізаційні стратегії з використанням розподілених обчислень та паралельної обробки для підвищення швидкодії алгоритмів. Для глибоких нейронних мереж рекомендовано використання декількох GPU, що може значно зменшити час навчання моделі на великих наборах зображень.

Окреслено перспективи створення гібридних моделей, що поєднують різні алгоритмічні підходи для підвищення ефективності та точності класифікації зображень військової техніки. Також важливим є впровадження процедур очищення та нормалізації даних для забезпечення високої якості вхідної інформації.

Ключові слова: *машинне навчання, класифікація зображень, військова техніка, нейронні мережі, метод опорних векторів, точність класифікації, обчислювальні ресурси.*

N. O. FESOKHA
PhD, Senior Lecturer at the Department of Computer Information Technologies
Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications
and Information Technology
ORCID: 0000-0002-9797-5589

O. M. NESTEROV
PhD, Head of the Department of Combat Application of Communication Units
Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications
and Information Technology
ORCID: 0000-0001-5092-6205

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS IN THE CLASSIFICATION OF MILITARY EQUIPMENT IMAGES

The article analyses the effectiveness of machine learning algorithms in classifying images of military equipment. It examines linear regression, decision trees, support vector methods, and deep neural networks according to criteria of training speed, prediction accuracy, scalability, and computational requirements. It has been established that neural networks demonstrate the highest accuracy (96 %), but require significant resources and training time (600 seconds). The support vector method provides an accuracy of 88 % with moderate resource consumption, while random forests show an optimal balance between accuracy (85 %) and training speed (80 seconds).

Key efficiency factors have been identified: data size, model complexity, computational resources, and input data quality. Experiments conducted demonstrate that the training time for neural networks and the support vector method increases linearly in proportion to the increase in the number of images. At the same time, random forests exhibit a nonlinear increase in training time, indicating their ability to handle large sets of pictures of military equipment more efficiently.

Optimisation strategies have been proposed using distributed computing and parallel processing to enhance the performance of the algorithms. For deep neural networks, using multiple GPUs is recommended, which can significantly reduce the training time of the model on large image datasets.

Prospects for creating hybrid models that combine various algorithmic approaches to improve efficiency and accuracy in classifying images of military equipment have been outlined. Data cleaning and normalisation procedures are also essential to ensure high-quality input information.

Key words: *machine learning, image classification, military equipment, neural networks, support vector methods, classification accuracy, computational resources.*

Постановка проблеми

Підходи до розпізнавання зображень військової техніки постали серед ключових викликів сучасної науки й техніки, враховуючи шалене зростання обсягів інформації. Алгоритми машинного навчання пропонують потужні інструменти для аналізу та інтерпретації цих даних, відкриваючи нові перспективи для прийняття рішень та прогнозування. Проте ефективність цих алгоритмів лишається предметом дискусій через складність їх налаштування для класифікації зображень військової техніки, зумовлену неоднорідністю доступних наборів даних. Найважливішим завданням є розробка таких методів обробки, які дадуть змогу оптимізувати час обчислень, покращити точність прогнозів і адаптувати алгоритми до реальних умов. Ця задача має надзвичайно важливе практичне значення для збільшення ефективності ураження російської техніки під час військових операцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Значні за масштабом дослідження присвячені оцінці продуктивності алгоритмів машинного навчання у виявленні військової техніки в реальних умовах.

О. Данчак та М. Войтюк [2] зосереджують увагу на ефективності сховищ даних, оптимізованих для алгоритмів машинного навчання, що сприяють швидкому доступі та обробці великих обсягів інформації. Вони пропонують стратегії для покращення результативності цих алгоритмів у реальних умовах. В. Грицик [1] вивчає вплив аналізу великих даних на бізнес-процеси в цифрову епоху, підкреслюючи важливість машинного навчання для оптимізації бізнес-процесів та ухвалення рішень.

В. Лесик [4] досліджує використання методів машинного навчання для оцінки показників інтернет-ресурсів. Дослідниця вказує на те, що алгоритми машинного навчання є ключовими інструментами для аналізу великих наборів даних, що дозволяє автоматизувати процеси та забезпечити точні передбачення.

Ю. Сизоненко та співавтори [5] проводять огляди використання машинного навчання для аналізу великих даних, підкреслюючи роль глибокого навчання у підвищенні ефективності обробки даних. Їхні дослідження підтверджують важливість розробки спеціалізованих моделей, адаптованих до конкретних вимог. Колектив авторів на чолі з А. Дашкевич [3] аналізують продуктивність алгоритмів машинного навчання для систем виявлення вторгнень. Вони наголошують на важливості вибору оптимальних моделей для гарантування безпеки та забезпечення точних прогнозів.

Не зважаючи на різноманіття досліджень, залишаються невирішеними питання аналізу ефективності алгоритмів машинного навчання з точки зору їхньої ефективності у класифікації зображень військової техніки.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є аналіз ефективності алгоритмів машинного навчання при класифікації зображень військової техніки та виявлення оптимальних підходів до їх використання в умовах високого навантаження та великих обсягів інформації.

Викладення основного матеріалу дослідження

Дослідження чинних алгоритмів машинного навчання, крізь призму їхньої дієвості під час роботи з великими масивами даних, є наріжним каменем аналізу працездатності сучасних систем обробки інформації. Алгоритми, як-от лінійна регресія, дерева рішень, метод опорних векторів та глибинні нейронні мережі, сповідують різні підходи до обробки великих обсягів даних, що впливає на їхню точність та швидкість виконання. Скажімо, алгоритми глибинного навчання, хоча й забезпечують високу точність, потребують значних обчислювальних ресурсів та часу на тренування, особливо з ростом розмірів даних. З іншого боку, простіші алгоритми, такі як лінійна регресія, можуть бути швидкими та менш ресурсоємними, проте їхня ефективність може знижуватися за наявності складних і великомасштабних наборів даних.

У таблиці 1 подано порівняння основних алгоритмів за декількома критеріями, такими як швидкість навчання, масштабованість і точність прогнозів.

Таблиця 1

Порівняння досліджуваних алгоритмів машинного навчання для класифікації зображень військової техніки

Алгоритм	Опис алгоритму	Швидкість навчання	Точність прогнозів	Масштабність	Обчислювальні вимоги
Лінійна регресія	Можливість моделювання залежності між змінними за допомогою статистичних методів	Висока	Низька в складних завданнях	Висока	Низькі
1	2	3	4	5	6
Дерева рішень	Ієрархічна структура, що використовується для прийняття рішень на основі заданих правил	Середня	Середня	Обмежена у великих наборах	Середні
Метод опорних векторів	Метод класифікації та регресії, який визначає найкращу гіперплощину для розділення даних	Низька	Висока	Середня	Високі
Глибокі нейронні мережі	Модель з багатьма шарами нейронів, призначена для розпізнавання складних залежностей у даних	Низька	Висока	Висока	Дуже високі

Лінійна регресія, як один з найдавніших алгоритмів, переважно слугує для створення базових моделей передбачення, котрі використовуються для оцінювання та класифікації зображень військової техніки. Цей метод забезпечує швидкий результат, але його точність може поступатися у випадку роботи зі складними нелінійними даними. Дерева рішень вирізняються візуально зрозумілою структурою, що легко піддається інтерпретації, але їх ефективність падає зі збільшенням кількості ознак, які описують зображення ворожої військової техніки.

Метод опорних векторів, володіючи здатністю обробляти багатовимірні дані, знаходить застосування в обробці зображень, однак висуває високі вимоги до обчислювальних ресурсів. Глибокі нейронні мережі, здатні вивчати неймовірно складні залежності в даних, на сьогоднішній день є фундаментом розпізнавання зображень у реальному часі.

Для прикладу, штучний інтелект може використовувати алгоритми класифікації, зокрема машини опорних векторів (SVM) або глибокі нейронні мережі (DNN). Ці моделі здатні ефективно обробляти значні обсяги зображень та даних про військову техніку (табл. 2).

Таблиця 2

Порівняння алгоритмів штучного інтелекту для класифікації зображень військової техніки

Алгоритм ШІ	Призначення	Переваги	Недоліки
Глибокі нейронні мережі (DNN)	Обробка складних і неструктурованих даних	Висока точність, можливість глибокого навчання	Потребують великих обчислювальних ресурсів
Підтримуючі векторні машини (SVM)	Класифікація та прогнозування на основі великих даних	Висока точність, добре працює з лінійно роздільними даними	Менша ефективність для великих неструктурованих даних
Багатошарова персептронна модель (MLP)	Прогнозування та класифікація в реальному часі	Здатність обробляти дані в реальному часі	Чутливість до перенавчання моделі

Глибокі нейронні мережі (DNN) активно використовуються для опрацювання масштабних зібрань зображень, де виникає необхідність виявлення комплексних шаблонів. Вони пропонують високий рівень точності, однак потребують значних ресурсів для обчислень під час етапів навчання та прогнозування. Алгоритми опорних векторів (SVM) знаходять застосування у задачах класифікації, де військову техніку можна розмежувати, забезпечуючи точні результати прогнозування. Багатошарові перцептрони (MLP) ефективно використовуються для обробки значних потоків зображень, що дозволяє виконувати прогнозування на основі даних, що надходять у реальному часі.

Вибір алгоритму машинного навчання для класифікації зображень військової техніки, враховуючи обсяг даних та вимоги до точності, зображено на рис. 1.

В сучасних реаліях, алгоритми машинного навчання стали ключовими інструментами для класифікації зображень військової техніки. Прості методи, на кшталт лінійної регресії, добре себе проявляють на невеликих наборах даних, дозволяючи швидко оцінювати зображення військової техніки з мінімальним навантаженням на ресурси. Для середніх обсягів даних та потреби в розумінні процесу класифікації доцільно застосовувати дерева рішень, особливо коли важлива візуалізація етапів прийняття рішення.

Коли зображення військової техніки демонструють значну складність в ідентифікації, метод опорних векторів здатен забезпечити високу точність, але вимагає відповідних обчислювальних потужностей. Зрештою, для найбільш комплексних задач обробки зображень військової техніки, найкращим рішенням є глибокі нейронні

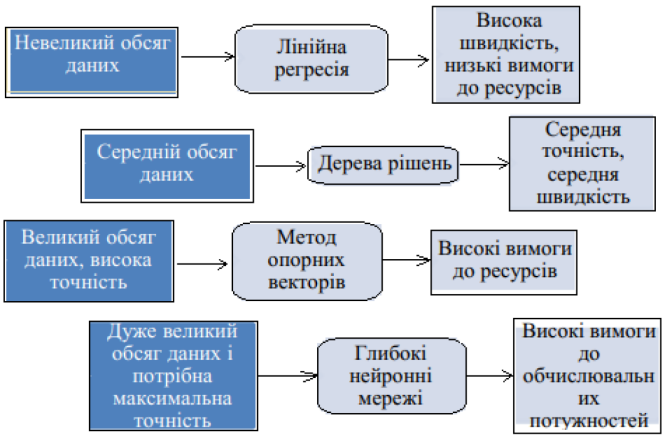


Рис. 1. Схематичне зображення вибору алгоритму машинного навчання при здійсненні класифікації зображень військової техніки

мережі, що дозволяють виявляти складні взаємозв'язки та ефективно використовувати сучасні обчислювальні системи для масштабованого навчання та прогнозування.

Обчислювальні можливості також визначають вибір алгоритму, адже алгоритми потребують значних ресурсів для обробки великих масивів зображень військової техніки. Алгоритми з великими вимогами до ресурсів, наприклад, метод опорних векторів або нейронні мережі, можуть суттєво сповільнювати навчання та обробку зображень військової техніки за обмежених обчислювальних можливостей. Крім цього, на якість моделі впливає також якість вихідних даних. Алгоритми демонструють кращі результати, якщо дані попередньо оброблені та очищені від шуму чи відсутніх значень.

В таблиці 3 наведено порівняльну характеристику ключових факторів, які впливають на швидкість та точність обробки зображень військової техніки різними алгоритмами машинного навчання.

Таблиця 3

Вплив факторів на швидкість і точність обробки зображень військової техніки різними алгоритмами машинного навчання

Фактор	Вплив на швидкість обробки	Вплив на точність обробки	Пояснення
Розмір даних	Знижує швидкість	Залежить від алгоритму	Значні обсяги даних можуть знижувати швидкодію складних алгоритмів, зокрема нейронних мереж, через зростання обчислювальних витрат
Складність моделі	Знижує швидкість	Підвищує точність	Збільшення кількості параметрів або шарів у моделі призводить до тривалішого процесу навчання та складнішого налаштування
Обчислювальні ресурси	Підвищує швидкість	Не впливає	Використання потужних серверів або розподілених обчислювальних систем сприяє швидшій обробці даних
Якість вхідних даних	Не впливає значно	Підвищує точність	Забезпечення попередньої підготовки та очищення даних сприяє зменшенню ризику неточних прогнозів

У сучасних умовах воєнних дій суттєво змінилися основні чинники, що визначають швидкість і точність обробки баз зображень військової техніки, що стало можливим завдяки прогресу обчислювальних технологій та новим методам управління даними. Об'єм даних неухильно зростає внаслідок широкого впровадження Інтернету речей (IoT), соціальних мереж та великих комерційних і наукових систем збору даних. Це потребує застосування складніших алгоритмів та потужніших обчислювальних ресурсів.

Порівняння ефективності алгоритмів машинного навчання на основі практичних експериментів з аналізу є одним з ключових способів виявлення найефективніших підходів до оцінювання зображень військової техніки. У таблиці 4 представлено результати експериментів, що містять основні показники роботи алгоритмів під час обробки зображень військової техніки різних розмірів та рівнів складності.

Експерименти проводились з використанням різноманітних збірок зображень військової техніки, з метою визначення ефективності алгоритмів у середовищі, максимально наближеному до реальних умов. Наприклад, для нейронних мереж зафіксовано найвищу точність у 96 %, однак час навчання значно перевищував показники інших алгоритмів, що обумовлено великою кількістю параметрів, необхідних для обробки зображень. Метод опорних векторів продемонстрував точність у 88 % з середнім часом навчання (410 секунд) та помірним споживанням ресурсів.

Випадкові ліси виявились ефективними у класифікації зображень військової техніки, забезпечуючи точність 85 % з відносно швидким навчанням (80 секунд), що робить їх оптимальним рішенням для даного типу задач.

Таблиця 4

Основні показники роботи алгоритмів при обробці зображень військової техніки

Алгоритм	Точність (%)	Час навчання (с)	Обчислювальні ресурси (CPU)	Обсяг даних (млн записів)
Нейронні мережі	96	600	Високі	2.0
Метод опорних векторів	88	410	Середні	1.1
Випадкові ліси	85	80	Середні	3.0
Лінійна регресія	75	50	Низькі	0.6
K- ближчих сусідів	76	280	Середні	0.8

Лінійна регресія показала точність 75 %, і цей показник є прийнятним для простих задач розпізнавання зображень військової техніки, але її незначні вимоги до обчислювальних ресурсів та час навчання усього 50 секунд, роблять цей алгоритм ефективним у простих моделях. Алгоритм K-найближчих сусідів продемонстрував середню точність (76 %) та відносно тривалий час навчання (280 секунд), що обмежує його використання на великих наборах зображень військової техніки.

Аналіз результатів демонструє, що вибір алгоритму залежить від його складності, обсягу даних та вимог до точності. Для складних завдань нейронні мережі демонструють високу результативність, тоді як для швидкого аналізу більш доцільно використовувати простіші моделі, як-от лінійна регресія. В таблиці 5 представлено аналіз взаємозв'язку між обсягом зображень та часом навчання алгоритмів.

Таблиця 5

Взаємозв'язок між обсягом зображень та часом навчання алгоритмів

Алгоритм	Обсяг даних (млн записів)	Час навчання (с)
Нейронні мережі	1.0	300
Нейронні мережі	2.5	600
Метод опорних векторів	0.6	200
Метод опорних векторів	1.2	450
Випадкові ліси	1.5	70
Випадкові ліси	3.1	120

Експериментальні дані демонструють, що час, потрібний для навчання нейронних мереж та методу опорних векторів, зростає лінійно пропорційно до збільшення кількості зображень. Це пояснюється складним характером цих моделей, яким потрібно більше обчислювальних ресурсів з кожним новим прикладом у наборі даних. Натомість випадкові ліси демонструють нелінійне збільшення часу навчання, що вказує на їхню здатність більш ефективно обробляти великі масиви зображень військової техніки, завдяки розподіленню обробки між окремими деревами рішень.

Для глибоких нейронних мереж паралельне навчання, використовуючи декілька GPU, може значно зменшити час, потрібний для навчання моделі на великих наборах зображень військової техніки. Однак виникає необхідність у синхронізації результатів між різними обчислювальними вузлами, що може бути непростою задачею. Алгоритми ансамблевого навчання, наприклад, випадкові ліси або градієнтний бустинг, дозволяють розподілити процес аналізу зображень військової техніки між різними компонентами системи, даючи змогу паралельно виконувати незалежний аналіз для кожного дерева рішень або послідовної моделі, але це потребує значних обчислювальних ресурсів.

Висновки

Встановлено, що ефективність алгоритмів машинного навчання для класифікації зображень військової техніки визначається низкою ключових чинників, серед яких – обсяг даних, доступні обчислювальні ресурси та якість вхідного зображення. Основні труднощі, що виникають під час обробки зображень військової техніки пов'язані з обмеженою здатністю алгоритмів до масштабування, потребою у великих обчислювальних потужностях, а також із тривалим часом навчання моделей. Для підвищення швидкодії алгоритмів рекомендуємо використовувати оптимізаційні стратегії, такі як розподілені обчислення та паралельна обробка, що дозволяє зменшити затримки при аналізі великих обсягів зображень і забезпечити узгодженість результатів між різними вузлами системи. Крім того, важливим є впровадження процедур очищення та нормалізації даних.

Перспективним напрямом є створення гібридних моделей, що поєднують різні алгоритмічні підходи для досягнення вищої ефективності та точності прогнозування в умовах складної обробки зображень військової техніки даних.

Список використаної літератури

1. Грицик В. В. Основні оцінки якості зображення, які сьогодні використовуються при розв'язуванні проблеми автоматичної обробки образів. *Штучний інтелект*, 2017, № 1, С. 38–44. http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/132099
2. Данчак О., Войтюк М. Ефективні сховища даних для рішень машинного навчання. *Herald of Khmelnytskyi National University*. *Technical sciences*. 2024. Вип. 337. № 3(2). С. 57–63. doi: https://doi.org/10.31891/2307–5732–2024–337–3-8
3. Дашкевич А. О. Дослідження багатошарових нейронних мереж для автоматичного виділення ознак при вирішенні задачі розпізнавання образів. *Науковий вісник ТДАТУ*, 2016. №6(2), С. 134–139. https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/883b0aec–89a9–48c9-bb07–3c515300dd80/content
4. Лесик В. О., Дорошенко А. Ю. Модуль стиснення зображень на основі нейромережевих автокодувальників. *Моделі та методи машинного навчання. Проблеми програмування*. 2023. № 1. С. 48–57. https://pp.isofts.kiev.ua/index.php/ojs1/article/download/558/612
5. Сизоненко Ю. І. Система стиснення та захисту зображень за допомогою нейтронної мережі. *Актуальні задачі та досягнення у галузі кібербезпеки. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції 23–25 листопада 2016 р*. м. Кропивницький. 2016. С. 157–158. https://core.ac.uk/download/pdf/84825428.Pdf

References

1. Hrytsyk V. V. (2017) Osnovni otsinky yakosti zobrazhennia, yaki sohodni vykorystovuiutsia pry rozviazuvanni problemy avtomatychnoi obrobky obraziv [Basic image quality metrics used today for solving the problem of automatic image processing]. *Shtuchnyi intelekt*, vol. –, no. 1, pp. 38–44. http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/132099
2. Danchak O., Voitiuk M. (2024) Efektyvni skhovyshcha danykh dlia rishen mashynnoho navchannia [Efficient data warehouses for machine learning solutions]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, vol. 337, no. 3(2), pp. 57–63. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-8
3. Dashkevych A. O. (2016) Doslidzhennia bahatosharovykh neironnykh merezh dlia avtomatychnoho vyznachennia oznak pry vyrishenni zadachi rozpiznavannia obraziv [Study of multilayer neural networks for automatic feature extraction in image recognition tasks]. *Naukovyi visnyk TDATU*, vol. –, no. 6(2), pp. 134–139. https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/883b0aec-89a9-48c9-bb07-3c515300dd80/content
4. Lesyk V. O., Doroshenko A. Yu. (2023) Modul stysnennia zobrazhen na osnovi neironerezhevykh avtokoduvalnykiv [Image compression module based on neural autoencoders]. *Problemy prohramuvannia. Modeli ta metody mashynnoho navchannia*, vol. –, no. 1, pp. 48–57. https://pp.isofts.kiev.ua/index.php/ojs1/article/download/558/612
5. Syzonenko Yu. I. (2016) Systema stysnennia ta zakhystu zobrazhen za dopomohoiu neitronnoi merezhi [System for image compression and protection using a neural network]. *Aktualni zadachi ta dosiahnennia u haluzi kiberbezpeky. Materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii*, 23–25 lystopada 2016 r., m. Kropyvnytskyi, pp. 157–158. https://core.ac.uk/download/pdf/84825428.pdf

УДК 004.45/.4`6 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.46

І. С. ЧЕПУРНА
асистентка кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0008-2442-6221

І. О. ШЕВЧЕНКО
магістрант кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0006-1867-374X

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ UNIX-ПОДІБНИХ СИСТЕМ

В статті пропонується метод підвищення ефективності функціонування UNIX-подібних операційних систем, спрямований на забезпечення стабільної та надійної роботи серверної інфраструктури корпоративної мережі в умовах високого навантаження та обмежених апаратних ресурсів. Цей підхід передбачає використання механізмів автоматизації основних системних ресурсів, що сприяють безперервній роботі серверної інфраструктури, а також реалізацію оптимізаційних заходів на основі методів моніторингу та діагностики за допомогою вбудованих системних утиліт. Запропонований метод дозволяє своєчасно виявляти та усувати потенційні збої, запобігати надмірному використанню ресурсів та забезпечувати стабільну та безперервну роботу системи в умовах високого навантаження. В роботі надаються рекомендації щодо автоматизації процесів моніторингу та управління ресурсами, а також можливості інтеграції запропонованого методу з централізованими системами управління, що використовують засоби раннього виявлення в режимі реального часу. Використання інтелектуальних підходів до адміністрування сприяє підвищенню загальної продуктивності, стабільності та енергоефективності серверної інфраструктури. Особлива увага приділяється оптимізаційним заходам, що зменшують навантаження на апаратні ресурси, зменшують затримки при обробці великих даних та підвищують енергоефективність серверної інфраструктури. Ефективність реалізації запропонованого методу було перевірено шляхом моделювання перевантаження серверної системи локальної комп'ютерної мережі кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки. Результати підтвердили доцільність та ефективність застосування запропонованого підходу для забезпечення стабільної роботи серверів в сучасних корпоративних мережах.

Ключові слова: *метод, автоматизація, моніторинг, надійність, сервер.*

I. S. CHEPURNA
Assistant at the Department of Electronic Computing Machines
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0008-2442-6221

I. O. SHEVCHENKO
Master's Student at the Department of Electronic Computing Machines
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0006-1867-374X

METHOD FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF FUNCTIONING UNIX-LIKE SYSTEMS

The article proposes a method for improving the efficiency of the functioning of UNIX-shaped operating systems, aimed at ensuring stable and reliable operation of the server infrastructure of the corporate network in conditions of high load and limited hardware resources. This approach involves the use of automation mechanisms for the main system resources that contribute to the continuous operation of server infrastructure, as well as the implementation of optimization measures based on methods of monitoring and diagnostics using built -in system utilities. The proposed method allows you to detect and eliminate potential failures in a timely manner, prevent excessive use of resources and ensure stable and continuous operation of the system in high load conditions. The work provides recommendations on the automation of the processes of monitoring and management of resources, as well as the possibilities of integration of the proposed method with centralised control systems that use early detection tools in real time. The use of intellectual approaches to administration helps to increase the overall productivity, stability and energy efficiency of server infrastructure. Particular attention is paid to optimization measures that reduce the load on hardware resources, reduce the delays in large data processing and improve the energy efficiency of server infrastructure. The efficiency of implementation of the proposed method has been verified by modelling the overload of a server system of the local computer network of the Department of Electronic

Computing Machines of Kharkiv National University of Radio Electronics. The results have confirmed the expediency and efficiency of applying the proposed approach to ensure stable servers in modern corporate networks.

Key words: *method, automation, monitoring, reliability, server.*

Постановка проблеми

Розвиток інформаційно-комунікаційних технологій сучасного суспільства формує новий інформаційний простір, в якому цифрові технології значно переважають традиційні засоби обробки та передачі інформації. Проте це спричиняє експоненціальне зростання обсягів інформаційних ресурсів, функціонування яких забезпечується за рахунок розвиненої серверної інфраструктури [1]. В сучасних умовах мережна інфраструктура будується з використанням технологій віртуалізації та контейнеризації, що дозволяє створювати гнучкі, масштабовані та продуктивні серверні середовища, які виступають основою ресурсного забезпечення інформаційних систем [2].

Особливої актуальності набуває проблема забезпечення високої продуктивності серверних систем в умовах постійного зростання обсягів обчислювальних ресурсів для обробки даних. Забезпечення ефективної роботи таких систем також залежить від здатності операційної системи (ОС) сервера ефективно керувати доступними апаратними ресурсами [3].

Сучасні підходи до забезпечення продуктивності мережної інфраструктури, зокрема серверів, базуються на комплексному підході, що забезпечує інтеграцію методів моніторингу, аналізу та оптимізації системних ресурсів [4]. Використання вбудованих утиліт операційної системи для збору телеметричних даних в UNIX-подібних операційних системах дозволяє виявляти критичні події та «вузькі місця» у функціонуванні системи [5]. Отримані дані стають підґрунтям для забезпечення стабільної та безперервної роботи ОС, прогнозування та застосування оптимізаційних рішень, що дозволяють зменшити затримки в обробці запитів, знизити споживання ресурсів та виявляти критичні події на ранніх етапах, а також мінімізувати ручне керування шляхом впровадження автоматизації процесів.

Таким чином, забезпечення продуктивності розвиненої мережної інфраструктури, зокрема серверного середовища, вимагає потужного апаратного забезпечення та комплексного підходу щодо управління ресурсами, особливо в умовах обмеження апаратних ресурсів та динамічної зміни навантаження в сучасних корпоративних мережах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Точкові дослідження в сфері продуктивності комп'ютерних мереж зосереджені на вирішенні ключових проблем, пов'язаних із забезпеченням високої продуктивності, стабільності, безпеки та масштабованості в умовах інтенсивного використання обчислювальних ресурсів. Активне впровадження технологій віртуалізації та контейнеризації, а також потреба в ефективному розгортанні ізольованих середовищ, зумовлюють необхідність постійного моніторингу та динамічного балансування навантажень для оптимального розподілу системних ресурсів [6, 7].

Зокрема, в роботі [8] наголошується на постійному зростанні енергоспоживання внаслідок перевантаження центрів обробки даних, зокрема в хмарних середовищах, – від 200 ТВт · год у 2016 році до прогнозованих 2967 ТВт · год у 2030 році. Автори підкреслюють важливість впровадження засобів віртуалізації та автоматизації управління ресурсами на різних рівнях, від програмного забезпечення до операційної системи та інфраструктури віртуалізації, з метою підвищення енергоефективності та зниження викидів CO_2.

Додатки, орієнтовані на обробку великих даних, потребують значних обчислювальних ресурсів, а також відповідного середовища для зберігання, обробки та аналітики інформації в розподілених системах. Це зумовлює експоненційне зростання навантаження на серверні потужності. Як зазначено в роботі [9], ефективне застосування контейнеризації, механізмів планування контейнерів, інструментів керування, автоматизованого розгортання та масштабування дозволяє суттєво знизити навантаження, водночас забезпечуючи балансування ресурсів, що є критично важливим при побудові масштабованих серверних архітектур.

Водночас, хоча вищезгадані фактори суттєво впливають на продуктивність серверного середовища, вони можуть бути менш критичними порівняно з проблемами, пов'язаними з внутрішньою неефективністю роботи самої операційної системи. До таких проблем належать накопичення тимчасових або зайвих файлів, неефективне управління фоновими процесами, надмірне споживання ресурсів окремими службами, а також відсутність оптимального розподілу ресурсів між системними компонентами.

В роботі [10] обґрунтовано, що одним з ефективних підходів до підвищення продуктивності операційних систем в серверному середовищі є впровадження ієрархічних моделей управління ресурсами, орієнтованих на багаторівневу оптимізацію. Зокрема, застосування планувальника рутинного технічного обслуговування (ROS) та модуля раннього виявлення збоїв (ETM) забезпечує проактивне управління системним станом. ROS виконує автоматизовану організацію циклічних завдань з очищення, діагностики та профілактики, знижуючи ризики накопичення помилок, тоді як ETM виконує безперервний моніторинг і виявлення аномалій на ранніх етапах. Комплексне використання цих компонентів сприяє підвищенню стабільності, енергоефективності та загальної продуктивності операційної системи, що є критично важливим для високонавантажених серверних інфраструктур.

Додатково, як показано в роботі [11], перспективним напрямом оптимізації є інтеграція інтелектуальних механізмів самоналаштування та автономного управління, що базуються на методах штучного інтелекту та машинного

навчання. Зважаючи, що існуючі програмні рішення здатні реагувати на збої та виконувати базове налаштування, їх автономність залишається обмеженою через відсутність гнучких механізмів моніторингу в реальному часі та недостатню реалізацію зворотного зв'язку. Це значно ускладнює реалізацію повністю адаптивних систем керування.

Впровадження системного моніторингу стану операційної системи, що підтверджено в роботах [12, 13], підкреслює ефективність використання вбудованих системних утиліт в операційних системах UNIX-подібного типу для контролю за станом ОС та споживанням ресурсів. Такий підхід дозволяє забезпечити високий рівень прозорості функціонування системи, мінімізуючи потребу в використанні стороннього програмного забезпечення, що є актуальним в середовищах з обмеженими ресурсами. Таким чином, використання стандартних інструментів моніторингу виступає важливим елементом в побудові ефективної моделі адміністрування серверних операційних систем.

Таким чином, аналіз останніх досліджень та публікацій [6–13] показує важливість розробки та впровадження інтелектуальних підходів до оптимізації функціонування операційних систем серверного рівня, які здатні забезпечити адаптивність до змінних умов експлуатації, проактивне виявлення та попередження збоїв, а також автоматизоване управління ресурсами з мінімальним втручанням з боку адміністратора. Інтеграція інструментів раннього виявлення аномалій, засобів інтелектуального моніторингу в реальному часі та використання вбудованих системних утиліт сприяє підвищенню загальної продуктивності, стабільності та енергоефективності серверних інфраструктур, що функціонують в умовах високого навантаження та обмежених ресурсів.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка методу підвищення ефективності функціонування операційних систем UNIX–подібного типу, орієнтованого на забезпечення стабільної, надійної та енергоефективної роботи серверної інфраструктури шляхом впровадження системного моніторингу, автоматизованого управління ресурсами та раннього виявлення збоїв.

Викладення основного матеріалу дослідження

Алгоритмичне забезпечення

Розроблений метод передбачає комплексний підхід до забезпечення стабільності, надійності та енергоефективності функціонування ОС, яке забезпечено поєднанням моніторингу, автоматизованого управління ресурсами та механізмів виявлення збоїв. Алгоритм складається з наступних етапів:

1. Ініціалізація системного моніторингу.

На цьому етапі здійснюється запуск скриптів, призначених для початкового збору та періодичного оновлення системної інформації щодо основних обчислювальних ресурсів, зокрема процесору, оперативної пам'яті та дискового простору. Збір метрик виконується через використання стандартних вбудованих утиліт UNIX–подібних систем, а зібрані дані зберігаються у системних лог-файлах, які створюються в окремому каталозі.

2. Автоматизоване управління ресурсами.

На другому етапі здійснюється автоматизоване управління ресурсами шляхом впровадження механізмів, що забезпечують технічне обслуговування та автоматичне реагування на події, які пов'язані з деградацією основних ресурсів UNIX–подібної операційної системи. Основним інструментом автоматичного управління ресурсами слугує вбудований планувальник завдань cron, який дозволяє виконувати скрипти з визначеним інтервалом без втручання адміністратора в фоновому режимі. За необхідністю в скрипти додаються логічні модулі не лише для регулярної перевірки, а в разі виявлення збою, модуль виконання автоматичного перезапуску встановлених сервісів, що є критично важливим для служб резервного копіювання або віддаленого доступу. Кількість логічних модулів в скрипті визначається рівнем навантаження на ресурси, специфікою сервісів, які обслуговує серверна інфраструктура, та цільовим призначенням моніторингу. Частота виконання певного модулю скрипта відповідає критичності задачі моніторинга, що дозволяє мінімізувати участь адміністратора в рутинному обслуговуванні системи, забезпечуючи зниження ризику помилок та підвищуючи стабільність роботи серверної інфраструктури в умовах безперервного навантаження.

3. Контроль системного журналювання.

На цьому етапі реалізується контроль системного журналювання через безперервний аналіз системних журналів і повідомлень ядра з метою виявлення аномалій, помилок та несанкціонованих дій в режимі реального часу або з визначеною мінімальною затримкою, що важливо для раннього виявлення або прогнозування збоїв програмного забезпечення та потенційних загроз безпеки. Виявлені інциденти фіксуються у звітному журналі та формують тригер для сповіщень адміністратору. Таким чином контроль журналювання сукупно з попередніми етапами дозволяє сформувати базовий рівень захисту інфраструктури та первинну діагностику виявлених збоїв.

4. Механізм сповіщення та реагування.

Впровадження механізмів сповіщення на цьому етапі дозволяє своєчасне реагування на виявлені збої або критичні помилки в роботі операційної системи, що мінімізує час простою та відновлення системи, знижує ймовірність втрати даних та забезпечує безперервність надання сервісів. На цьому етапі може бути впроваджена інтеграція з централізованою системою моніторингу, що застосовується в корпоративній мережі. Таким чином, організація оперативного інформування адміністратора створює передумови для впровадження автоматизованої

реакції на системні збої або потенційні загрози, що загалом підвищує надійність і безпеку серверної інфраструктури, а також стабільність функціонування всієї корпоративної мережі.

5. Циклічний аналіз та адаптація.

На цьому етапі виконується формування повноцінного циклу моніторингу, який складається з діагностики, реагування на подію, адаптацію системи до вжитих заходів та прогнозування поведінки системи до змін навантаження.

Псевдокод, наведений нижче, дозволяє більш точно описати логіку виконання методу. В ньому зазначені конкретні умови, цикли, виклики функцій та обробку даних, що важливо для розуміння послідовності операцій в запропонованому методі.

```
1. START MonitoringSystem

2. INIT monitoring_scripts
   EVERY 5 min:
      RUN `free`, `vmstat`, `uptime`
      SAVE to /var/log/perf_metrics.log

3. INIT crontab_tasks
   DAILY:
      DELETE files in /tmp, /var/tmp
      RUN `df –h`, `du –sh /var/*`
      IF disk_usage > threshold THEN
      REMOVE oldest files from /var/log/
      ENDIF
      CHECK services [sshd]
      IF service_down THEN
         RESTART service
      ENDIF

4. INIT log_analyzer
   EVERY hour:
      SCAN dmesg for errors
      SCAN /var/log/syslog, auth.log, kern.log
         FOR keywords [fail, error, panic, unauthorized]
         IF found THEN
            LOG to security_alerts.log
            SEND alert to admin (email/Telegram)
         ENDIF

5. INIT notification_dispatcher
   IF alert_generated THEN
      FORMAT message with timestamp + error
      SEND to:
         – Email address
         – Telegram Bot
         – Monitoring System API
   ENDIF

6. INIT weekly_analysis
   EVERY week:
      PARSE /var/log/perf_metrics.log
      BUILD baseline using mean, stddev
      IF deviation > threshold THEN
         APPLY:
            – renice high–CPU tasks
            – ionice disk–heavy processes
            – background non–critical daemons
      ENDIF

7. END MonitoringSystem
```

Лістинг 1. Псевдокод запропонованого методу

Оцінка ефективності розробленого методу

Загальна ефективність методу підвищення функціонування Unix–подібних операційних систем може бути визначена шляхом зваженої оптимізації ключових факторів, зокрема максимізації стабільності, мінімізації кількості збоїв системи, енергоспоживання та скорочення затримки реагування на події. Ефективність методу F_{eff} визначається у вигляді багатофакторної оптимізаційної задачі наступного вигляду:

$$\max_t E(t) = w_1 \cdot S(t) - w_2 \cdot R(t) - w_3 \cdot P(t) - w_4 \cdot L(t), \quad (1)$$

де w_1, w_2, w_3, w_4 – вагові коефіцієнти, які визначають пріоритетність відповідного критерію задачі.

Компоненти оптимізаційної задачі (1) представлені нижче:

1. Оцінка стабільності системи $S(t)$ визначається часом безперервної роботи системи., що максимізується шляхом продовження аптайму. Оцінка стабільності системи може бути обчислена як:

$$S(t) = \frac{T_{uptime}}{T_{total}}, \quad (2)$$

де T_{uptime} – тривалість безперервної роботи системи без перезавантаження або критичних збоїв, с; T_{total} – загальний час моніторингу, с.

2. Оцінка надійності системи $R(t)$ визначається кількістю збоїв або помилок, що виникають протягом часу спостереження. Зменшення кількості помилок є ключовим фактором підвищення загальної працездатності системи. Оцінка надійності системи може бути обчислена як:

$$R(t) = 1 - \frac{F(t)}{F_{\max}}, \quad (3)$$

де $F(t)$ – кількість зафіксованих збоїв або критичних помилок за час t, од.; $F_{\max}$ – максимально допустима кількість помилок у межах інтервалу спостереження, с.

3. Енергоефективність $P(t)$ характеризується рівнем енергоспоживання ОС під час роботи. Мінімізація енергоспоживання дозволяє знизити теплове навантаження та подовжити термін служби серверного обладнання. Енергоефективність може бути обчислена як:

$$P(t) = 1 - \frac{W(t)}{W_{\max}}, \quad (4)$$

де $W(t)$ – фактичне енергоспоживання системи на момент часу, Вт; $W_{\max}$ – максимально допустиме енергоспоживання системи, Вт.

4. Швидкість реагування $L(t)$ визначає затримку системи у відповідь на певні події, зокрема запуск скриптів, спрацювання тригерів моніторингу, помилки служб. Мінімізація затримки вказує на вищу оперативність системи. Швидкість реагування на події може бути обчислена як:

$$L(t) = 1 - \frac{D(t)}{D_{\max}}, \quad (5)$$

де $D(t)$ – фактична середня затримка системи у відповіді на події, мс; $D_{\max}$ – максимально допустима затримка реагування, мс.

Запропонований підхід дозволяє комплексно оцінити ефективність методу підвищення продуктивності Unix-подібних систем на основі ключових показників: стабільності, надійності, енергоефективності та швидкості реагування на події. Така модель забезпечує більш точну кількісну оцінку взаємозв'язку між ефективністю функціонування операційної системи та основними параметрами її роботи, надається відповідна вага.

Постановка експерименту

На початковому етапі було проведено аналіз апаратних вимог для операційної системи Ubuntu 18.04 LTS, яку було обрано в якості тестового середовища на лабораторному обладнанні кафедри електронних обчислювальних машин ХНУРЕ. Було визначено, що для забезпечення стабільної роботи обраної системи достатньо процесора, який складається з 2 ядер тактовою частотою 2,9 ГГц та 4 ГБ оперативної пам'яті. Дисковий простір складає 20 ГБ, який було надано операційній системі, забезпечує достатній обсяг для забезпечення стабільної роботи операційної системи, а також може бути використаний для розгортання необхідних сервісів, зокрема розгортання веб-сайту на базі вебсерверу Apache 2. Для передачі даних пропускна здатність каналу зв'язку становить не менше 1 Гбіт/с. В тестовому середовищі було створено як реальне навантаження у вигляді розгорнутого сайта, так і створено імітацію додаткового навантаження у вигляді фіктивних логів кожен розміром 200 Мб.

В рамках розробки методу підвищення ефективності функціонування ОС було створено та запущено автоматизований скрипт моніторингу стану операційної системи тестового середовища, який виконується за визначеним

розкладом за допомогою утиліти cron. На рис. 1 представлено узагальнену схему основних компонентів операційної системи, які підлягають моніторингу в рамках розробленого методу.

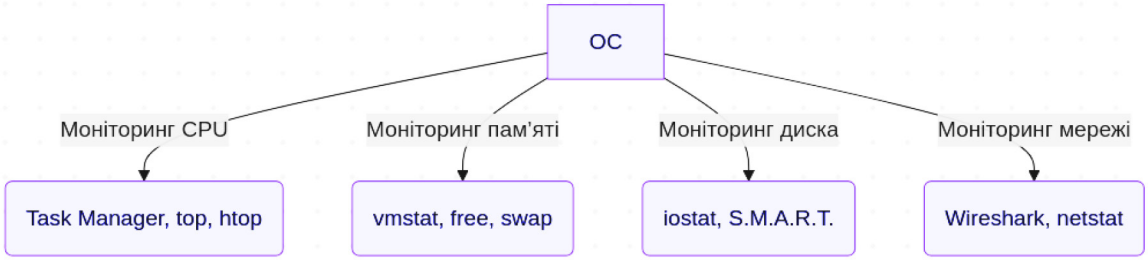


Рис. 1. Основні компоненти операційної системи, які підлягають моніторингу

Розроблений скрипт має модульну архітектуру, що дозволяє його адаптувати до вимог моніторингу, а також масштабувати, додаючи за потребою відповідні логічні блоки. Автоматизований скрипт охоплює основні компоненти операційної системи: CPU, оперативну пам'ять та дисковий простір. За результатами роботи скрипту додатково формуються сповіщення у вигляді повідомлень в месенджер адміністратора про критичні події або результати роботи скрипта, наприклад досягнення критичного рівня заповнення диску або видалення застарілих лог-файлів.

Архітектура скрипта містить наступні блоки:

1. Блок ініціалізації.

В цьому модулі визначено змінні середовища, перевірка прав доступу, створення лог-файлів та збереження результатів моніторингу, а також визначається поточний час виконання для формування звітів.

2. Блок збору метрик.

В цьому модулі виконується діагностика тестового середовища за допомогою вбудованих утиліт, при чому кожна команда запускається в окремому процесі, що забезпечує асинхронну обробку даних, забезпечуючи зниження затримки. Зокрема, утиліта free дозволяє отримати оперативні дані про використання оперативної пам'яті, що необхідно для виявлення потенційного дефіциту оперативної пам'яті та може призвести до зниження продуктивності. Утиліта vmstat забезпечує розширений моніторинг основних показників роботи ядра операційної системи, включаючи статистику процесів, навантаження на CPU, обмін пам'яттю, а також активність вводу/виводу. Це дозволяє оперативно виявити ознаки перевантаження або «вузькі місця» в роботі підсистеми. Утиліта htop використовується для загальної оцінки тривалості роботи системи та поточного стану активних процесів.

3. Блок обробки подій.

В цьому модулі виконується обробка критичних подій на основі виявлених підозрілих записів у лог-файлах, відбувається контроль заповнення дискового простору та очищення логів. Цей модуль видалення тимчасових та застарілих файлів, що зменшує навантаження на файлову систему та прискорює доступ до активних даних. Контроль обсягу дискового простору виконується з використанням утиліти df для оцінка зайнятого простору на розділах та утіліти du для аналізу обсягу каталогів, що дає змогу створити порогові правила для виявлення перевантажених розділів. В якості порогового значення дискового простору було обрано заповнення диску на 80 %, після чого скрипт виконує очищення кешу та тимчасових логів. Перевірка та перезапуск деградованих сервісів, зокрема Apache2, MySQL, SSH, для роботи вебсайту виконується через використання утиліти systemctl. В разі виявлення збою виконується автоматичний перезапуск сервісів, що додано до скрипту.

4. Блок сповіщень.

В разі виявлення інцидентів, зокрема новий стан системи, заповнення або очищення диску активується механізм сповіщень адміністратору (рис. 2).

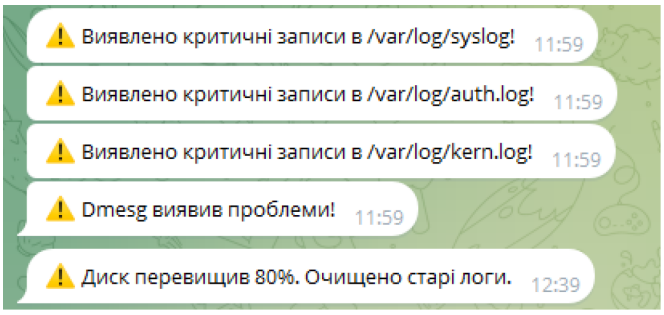


Рис. 2. Сповіщення в месенджері адміністратора про результати роботи автоматизованого скрипту

5. Блок логування та збереження статистики.

Зібрані метрики записуються в локальні файли з відповідним найменуванням. За результатами роботи скрипта за обраним часовим розкладом формується зведений звіт про навантаження за визначений період часу.

6. Блок автоматичного виконання.

В цьому модулі роботу скрипта інтегровано з планувальником подій – утилітою cron для запуску моніторингу операційної системи. Для тестування було обрано наступні періоди проведення моніторингу:

Monitor – виконання збору метрик та запис до лог-файлів кожні 5 хвилин про стан системних процесів;

daily – щоденне очищення тимчасових файлів, очищення диску та контроль системних служб;

hourly – погодинна перевірка логів на критичні записи та надсилання сповіщень про стан системи;

weekly – щотижневий звіт стану CPU.

Для інтеграції з планувальником подій цей скрипт було додано до конфігураційного файлу у вигляді відповідного запису, що формує політики моніторингу та формування звітів.

За результатами проведених тестувань роботи автоматизованого скрипту для моніторингу стану операційної системи було отримано наступні результати зміни досліджуваних показників операційної системи Ubuntu 18.04 (рис. 3).

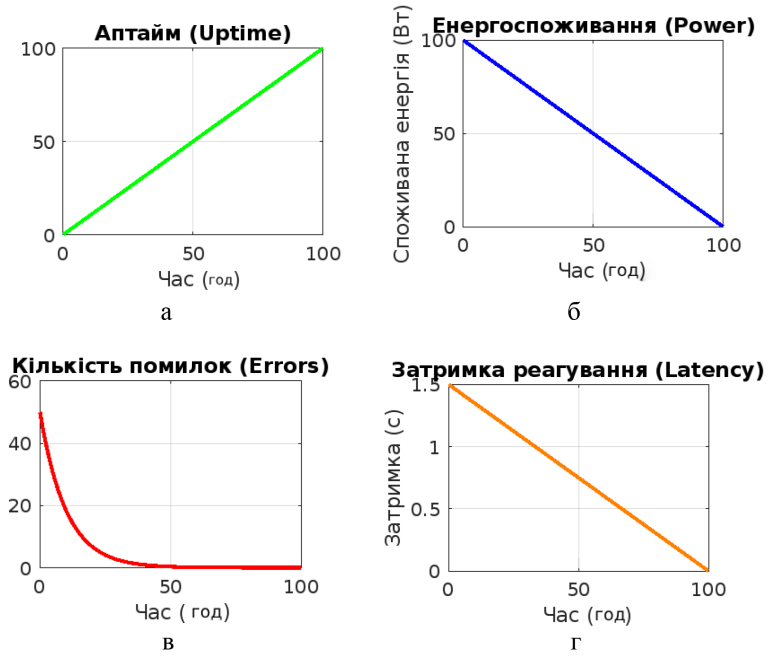


Рис. 3. Зміни показників ОС Ubuntu 18.04 LTS за часом: *а*) час аптайму; *б*) енергоспоживання ОС; *в*) кількість виявлених та виправлених помилок роботи; г) затримка реагування на події операційною системою

Висновки

В даній роботі було запропоновано та детально проаналізовано метод підвищення ефективності функціонування Unix-подібних операційних систем серверної інфраструктури. Запропонований метод базується на використанні автоматизованого скрипту для моніторингу системних показників в реальному часі, що дає змогу забезпечити стабільну та безперервну роботу ОС з мінімальним втручанням адміністратора. Метод дозволяє автоматизувати контроль стану системи, оркестрацію основних системних процесів, зменшуючи вплив людського фактора та підвищуючи надійність роботи. Наукова новизна полягає у впровадженні адаптивного механізму моніторингу, який фіксує поточний стан системи та забезпечує можливість прогнозування подальшого функціонування під час зростання навантаження, що дозволяє динамічне балансування між продуктивністю, енергоспоживанням та безпекою.

Проведене моделювання показало, що автоматизація та постійний моніторинг призводять до зниження латентності, кількості помилок та енергоспоживання, водночас підвищуючи аптайм системи, що сприяє підвищенню ефективності роботи серверу, та забезпечує довготривалу роботу та стабільність ОС, знижуючи ризики збоїв та мінімізуючи втручання адміністратора.

Таким чином, запропонований метод є доцільним для використання в серверній інфраструктурі корпоративних комп’ютерних мереж в умовах постійної зміни навантаження або в обмеженні апаратних ресурсів. Подальші дослідження доцільно зосередити на інтеграції запропонованого методу з системами інтелектуального моніторингу, який застосовується в сучасних корпоративних комп’ютерних з мережах для створення автономних систем адміністрування.

Список використаної літератури

1. Peñalvo, F. J. G., Sharma, A., Chhabra, A., Singh, S. K., Kumar, S., Arya, V., & Gaurav, A. (2022). Mobile cloud computing and sustainable development: Opportunities, challenges, and future directions. International Journal of Cloud Applications and Computing (IJCAC), 12(1), 1–20.
2. Arogundade, O. R., & Palla, K. (2023). Virtualization revolution: Transforming cloud computing with scalability and agility.
3. Apriani, D., Afrijaldi, R., Auliya, N., & Darmawan, A. A. (2024). Operating System and Server Integration for Business Effectiveness. IAIC Transactions on Sustainable Digital Innovation (ITSDI), 5(2), 91–99. https://doi.org/10.34306/itsdi.v5i2.615
4. Шостак, А. Р., Ткачов, В. М. (2023). Питання оптимізації бізнес-процесів з використанням сучасних інформаційних технологій.
5. Duin, J., McKeown, S., & Abubakar, M. (2024, June). Exploring DTrace as an Incident Response Tool for Unix Systems. In The International Conference on Cybersecurity, Situational Awareness and Social Media (pp. 169–193). Singapore: Springer Nature Singapore.
6. Queiroz, R., Cruz, T., Mendes, J., Sousa, P., & Simões, P. (2023). Container-based virtualization for real-time industrial systems – a systematic review. ACM Computing Surveys, 56(3), 1–38.
7. Martin, E. (2022). Virtualization and containerization: a new concept for data center management to optimize resources distribution.
8. Katal, A., Dahiya, S. & Choudhury, T. *Energy efficiency in cloud computing data centers: a survey on software technologies*. Cluster Comput 26, 1845–1875 (2023). https://doi.org/10.1007/s10586–022–03713–0
9. Singh, N., Hamid, Y., Juneja, S. et al. *Load balancing and service discovery using Docker Swarm for microservice based big data applications*. J Cloud Comp 12, 4 (2023). https://doi.org/10.1186/s13677–022–00358–7
10. Papaioannou, C.; Dimara, A.; Papaioannou, A.; Tzitzios, I.; Anagnostopoulos, C.–N.; Krinidis, S. Hierarchical Resources Management System for Internet of Things–Enabled Smart Cities. Sensors 2025, 25, 616. https://doi.org/10.3390/s25030616
11. Gill, S. S., Xu, M., Ottaviani, C., Patros, P., Bahsoon, R., Shaghaghi, A.,. Uhlig, S. (2022). AI for next generation computing: Emerging trends and future directions. Internet of Things, 19, 100514.
12. Umer, M. (2023). Architecture and Design of the Linux Storage Stack. Packt Publishing Ltd.
13. Davis, J. (2022). Modern System Administration. O'Reilly Media, Inc.

References

1. Peñalvo, F. J. G., Sharma, A., Chhabra, A., Singh, S. K., Kumar, S., Arya, V., & Gaurav, A. (2022). Mobile cloud computing and sustainable development: Opportunities, challenges, and future directions. International Journal of Cloud Applications and Computing (IJCAC), 12(1), 1–20.
2. Arogundade, O. R., & Palla, K. (2023). Virtualization revolution: Transforming cloud computing with scalability and agility.
3. Apriani, D., Afrijaldi, R., Auliya, N., & Darmawan, A. A. (2024). Operating System and Server Integration for Business Effectiveness. IAIC Transactions on Sustainable Digital Innovation (ITSDI), 5(2), 91–99. https://doi.org/10.34306/itsdi.v5i2.615
4. Shostak, A. R., Tkachov, V. M. (2023). Pytannia optymizatsii biznes-protsesiv z vykorystanniam suchasnykh informatsiinykh tekhnolohii.
5. Duin, J., McKeown, S., & Abubakar, M. (2024, June). Exploring DTrace as an Incident Response Tool for Unix Systems. In The International Conference on Cybersecurity, Situational Awareness and Social Media (pp. 169–193). Singapore: Springer Nature Singapore.
6. Queiroz, R., Cruz, T., Mendes, J., Sousa, P., & Simões, P. (2023). Container-based virtualization for real-time industrial systems – a systematic review. ACM Computing Surveys, 56(3), 1–38.
7. Martin, E. (2022). Virtualization and containerization: a new concept for data center management to optimize resources distribution.
8. Katal, A., Dahiya, S. & Choudhury, T. *Energy efficiency in cloud computing data centers: a survey on software technologies*. Cluster Comput 26, 1845–1875 (2023). https://doi.org/10.1007/s10586–022–03713–0
9. Singh, N., Hamid, Y., Juneja, S. et al. *Load balancing and service discovery using Docker Swarm for microservice based big data applications*. J Cloud Comp 12, 4 (2023). https://doi.org/10.1186/s13677–022–00358–7
10. Papaioannou, C.; Dimara, A.; Papaioannou, A.; Tzitzios, I.; Anagnostopoulos, C.–N.; Krinidis, S. Hierarchical Resources Management System for Internet of Things–Enabled Smart Cities. Sensors 2025, 25, 616. https://doi.org/10.3390/s25030616
11. Gill, S. S., Xu, M., Ottaviani, C., Patros, P., Bahsoon, R., Shaghaghi, A.,. Uhlig, S. (2022). AI for next generation computing: Emerging trends and future directions. Internet of Things, 19, 100514.
12. Umer, M. (2023). Architecture and Design of the Linux Storage Stack. Packt Publishing Ltd.
13. Davis, J. (2022). Modern System Administration. O'Reilly Media, Inc.

UDC 004.4:005.94 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.47

YU. V. SHABATURA
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Electromechanics and Electronics
National Academy of Land Forces named after Hetman Petro Sahaidachny
ORCID: 0000-0002-9961-1244
Scopus-Author ID: 6507636334

T. I. SMIRNOV
Postgraduate Student at the Department of Computer Science
Educational and Scientific Institute of Computer Sciences and Information Technologies
of National Forestry University of Ukraine
ORCID: 0009-0002-1400-4654

FEATURES AND DIFFERENCES OF USING GRAPH THEORY FOR ANALYSIS AND VISUALIZATION OF CONNECTIONS IN SOCIAL NETWORKS

This article explores the potential for adapting classical graph theory to the analysis of social networks through key criteria such as node types, edge types and weights, graph directionality, temporal variability, centrality metrics, community structures, analytical algorithms, big data processing, visualization, prediction capabilities, and the role of content. The aim of the research is to enhance the effectiveness of analyzing the structure and dynamics of social networks by applying graph theory methods and visualization tools to identify interaction patterns between users.

The paper provides a comparative analysis of how graph theory is applied to study the structure and user interactions in four of the most popular social networks: ***Facebook***, ***Instagram***, ***TikTok***, *and* ***LinkedIn***. *It discusses differences in graph structure (nodes, edges, edge weights, directionality), connection types and their evolution over time, the nature of user interactions, analytical approaches (methods and forecasting), big data handling, and visualization techniques.*

The key analytical methods used to examine connections within each of the selected networks are outlined, and visualizations of graphs representing these connections are presented. The study demonstrates that the defined graph-theoretical features for analyzing the structure of leading social networks can significantly improve the use of these tools in the areas of: ensuring ***cybersecurity****, supporting* ***political interest analysis*** *through public opinion monitoring, enhancing* ***customer relationship management****, and optimizing* ***social media algorithms****.*

Data sources for this type of analysis may include: direct platform data; data from electronic communication systems (e.g., email, chats, forums); internal organizational records; results of surveys conducted to map social ties and user interactions; and publicly available datasets.

The scientific novelty of the study lies in the development of a methodology for selecting appropriate types of graph models and visualization strategies for analyzing the structure and dynamics of multilevel social connections with maximum efficiency. The results obtained may be applied by government institutions, business entities, and civil society organizations to gain deeper insights into digital social interactions – not only at the level of basic connections (“friendship”, “subscription”), but also in more complex informational and behavioral contexts.

Key words: *social networks, graph theory, analysis, modeling, information technology, information system, data analysis, visualization of connections.*

Ю. В. ШАБАТУРА
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри електромеханіки та електроніки
Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
ORCID: 0000-0002-9961-1244
Scopus-Author ID: 6507636334

Т. І. СМІРНОВ
аспірант кафедри комп’ютерних наук
Навчально-науковий інститут комп’ютерних наук
та інформаційних технологій
Національного лісотехнічного університету України
ORCID: 0009-0002-1400-4654

АНАЛІЗ І ВІЗУАЛІЗАЦІЯ СКЛАДНИХ БАГАТОРІВНЕВИХ ЗВ'ЯЗКІВ У СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ ТА ЇХ ДИНАМІКИ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ ГРАФІВ

У статті розглянуті можливості адаптації класичної теорії графів до аналізу соціальних мереж у розрізі таких критеріїв як: типи вузлів, типи і ваги ребер, напрямленість графа, змінність у часі, метрики центральності, типи спільнот, алгоритми аналізу, оброблення великих даних, візуалізація, прогнозування, роль контенту. Метою проведення даного дослідження є підвищення ефективності аналізу структури та динаміки соціальних мереж на основі використання методів теорії графів і засобів їх візуалізації для виявлення закономірностей взаємодії між користувачами. У роботі здійснено порівняльний аналіз особливостей застосування теорії графів для вивчення структури та дослідження взаємодій між користувачами чотирьох таких найпопулярніших соціальних мереж як Facebook, Instagram, TikTok і LinkedIn. Розглянуто відмінності у структурі графів (вузли, ребра, ваги ребер, напрямленість), типах зв'язків та їх змінності у часі, характері взаємодій у соціальній мережі, особливостях аналізу (методи, прогноз), обробці великих даних і візуалізації. Наведено основні методи якими здійснюють аналіз зв'язків у кожній із розглянутих соціальних мереж. Здійснено візуалізацію графів, що відображають ці зв'язки. Доведено, що окреслені особливості застосування теорії графів для аналізу структури найпопулярніших соціальних мереж дозволять ефективніше використовувати даний інструментарій для забезпечення кібербезпеки; реалізації політичних інтересів із врахуванням тенденцій громадської думки; побудови якісної взаємодії із клієнтами; удосконалення алгоритмів соціальних мереж. Джерелами даних для такого аналізу можуть бути: дані безпосередньо із самих платформ; дані з платформ електронних комунікацій; внутрішні дані компаній та організацій; результати проведених опитувань про соціальні зв'язки та взаємодії через спеціально створені анкети; дані з публічних баз даних. Наукова новизна дослідження полягає у розробленні методики вибору видів графових моделей соціальних мереж та їх візуалізіцій для забезпечення максимальної ефективності проведення аналізу їх структури і динаміки багаторівневих зв'язків. Отримані результати можуть бути використані органами влади, представниками бізнесу та громадянського суспільства для глибшого аналізу цифрових взаємозв'язків – не тільки на рівні базових зв'язків («дружба», «підписка»), а й у складніших інформаційних і поведінкових контекстах.

Ключові слова: *соціальні мережі, теорія графів, аналіз, моделювання, інформаційна технологія, інформаційна система, аналіз даних, візуалізація зв'язків.*

Statement of the problem

Social networks have long since evolved from being mere platforms for sharing information, content, and communication on the Internet into tools actively used in politics, sociology, economics, and other spheres of human activity. Therefore, the need to analyze user interactions within social networks is becoming increasingly relevant in order to use these platforms more effectively to achieve specific goals.

Such interactions can be analyzed using social graphs and various network analytics methods. The key technologies applied here include:

- Graph databases for identifying opinion leaders, influencers, bots, and fake accounts, as well as analyzing social connections in large communities;
- Machine learning for predicting interactions and user behavior, which serves as the foundation for improving recommendation systems (e.g., Facebook, TikTok, Instagram), detecting anomalies (e.g., phishing, fraud), and forecasting viral content spread;
- Natural Language Processing (NLP) for analyzing user content and sentiment to detect hate speech, fake news, disinformation, emotion in comments and reviews, and for automating content moderation;
- Social Network Analysis (SNA) based on graph theory to explore user influence, detect communities, and evaluate user engagement within the network.

Social networks are constantly evolving, so even the use of graph theory for analyzing and visualizing user relationships requires new approaches that:

- account for fundamental differences in the functioning of various social networks and their user interaction models;
- cover not only general social connections (e.g., "friendship", "subscription") but also more complex and specific interactions (e.g., interpersonal relationships, group dynamics, influence networks, parallel engagements);
- incorporate temporal analysis of connections, including the emergence of new users or events;
- enable interactive and adaptive visualization, including large-scale data;
- support deeper analysis of specific influence types (psychological, economic, political) through corresponding graph types and multi-aspect user relationships (ranging from professional to friendly or romantic ties).

Such comprehensive research would extend current social network models and improve the analytical tools available to researchers, entrepreneurs, and developers.

Analysis of Recent Research and Publications

Various aspects of social network analysis and research have been more extensively covered in the works of foreign scholars.

For example, Albert-László Barabási developed the theory of scale-free networks [1]. Duncan J. Watts focused on the study of network structures and behaviors, the phenomenon of small-world networks, and the collective dynamics of human systems. He revealed fundamental rules governing the networks of people, machines, companies, economies, and the mechanisms of information diffusion in social networks [3–4].

Stanley Milgram introduced the concept of "six degrees of separation", which postulates that any person can be connected to any other through a chain of acquaintances or relationships involving no more than six intermediate steps. This idea helps explain user connections in large networks through intermediary contacts [5, pp. 60–67].

Among Ukrainian scholars, notable contributions include the works of A. Hizun and V. Hriha [8, p. 412], who analyzed the most common models of information dissemination in social networks within the context of information warfare. V. Mazurenko and S. Shtovba [13, pp. 62–74] focused on applying graph theory models for social network analysis.

A. Snarskyi, D. Lande, and I. Subach [12; 15] provided practical recommendations for mathematical and computational modeling, analysis, and visualization of complex networks. L. Didyk [10, pp. 95–105] examined the fundamental mechanisms of social network functioning. O. Shushura and B. Kokidko [16, pp. 12–17] developed approaches for analyzing and modeling social networks using graph databases and fuzzy logic.

Given that social networks are constantly evolving and differ significantly in their functioning principles, data structures, and user interaction models, and that most existing studies focus on general principles of analysis, it is advisable to expand these studies. This includes investigating the specific features and distinctions in the use of graph theory to analyze user interactions across different platforms. Such research would help fully understand not only general social connections (e.g., "friendship" or "subscription") but also specific types of relationships that reflect more complex interactions – such as interpersonal relationships, group dynamics, or influence networks.

This deeper understanding would enhance the analysis of social interactions, various types of influence (psychological, economic, political), allow adaptation to the unique features of different platforms, facilitate behavioral forecasting, reveal hidden patterns, and improve the algorithms used for analyzing social processes.

Research Objective

The aim of this article is to increase the efficiency of analyzing the structure and *dynamics of multilevel interactions* in social networks through the rational selection of their graph models and visualization tools, taking into account the specific features of their application, using the example of social networks such as Facebook, Instagram, TikTok, and LinkedIn.

Presentation of the Main Research Material

Various information technologies are used to study the structure of social networks, with graph theory, machine learning, and interaction analysis algorithms being among the most common. Their combined application enables the identification of key users, determination of behavioral patterns, measurement of influence, and detection of community structures within social networks. This facilitates a deeper understanding of human interaction and allows for predicting behavior in order to more effectively manage information flows.

Based on the analysis of classical applications of graph theory [2; 11] to social network analysis [14, p. 19–13], a graph-based schema has been developed (see Fig. 2). At the same time, it should be noted that the rapid development and widespread use of social networks create a pressing need for more in-depth research into the mechanisms of using this toolkit to analyze and visualize connections in the most popular platforms, such as Facebook, Instagram, TikTok, and LinkedIn [9].

It is evident that there are substantial differences between these platforms, as each of them operates on different principles and has distinct models of user interaction. These differences directly affect the structure of graphs and the methods used for their analysis.

Any social network can be formalized as a graph:

$$G = (V, E), \tag{1}$$

where $V = \{v1, v2, \ldots, vn\}$ is the set of vertices (users) of the network, $E = \{eij\}$ is the set of edges representing interactions between them.

The weight of an edge $w(eij)$ can be defined by the formula:

$$w(eij) = \alpha f_{like}(i, j) + \beta f_{comment}(i, j) + \gamma f_{share}(i, j), \tag{2}$$

where $f_{like}, f_{comment}, f_{share}$ – are functions that determine the number of likes, comments, and shares between users i and j, α, β, γ – are weight coefficients.

To analyze such a network, the adjacency matrix is used, which captures the presence and weights of connections between users.

For a multilayer network (e.g., Facebook, Instagram, TikTok, LinkedIn), the model can be formalized as:

$$G = \{G_{Facebook}, G_{Instagram}, G_{TikTok}\} \cup E_{cross}, \tag{3}$$

where E_{cross} – is the set of inter-network edges that define users active across multiple platforms simultaneously.

$$G_{multi} = (V_1 \cup V_2 \cup V_3, E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cup E_{inter}) \tag{4}$$

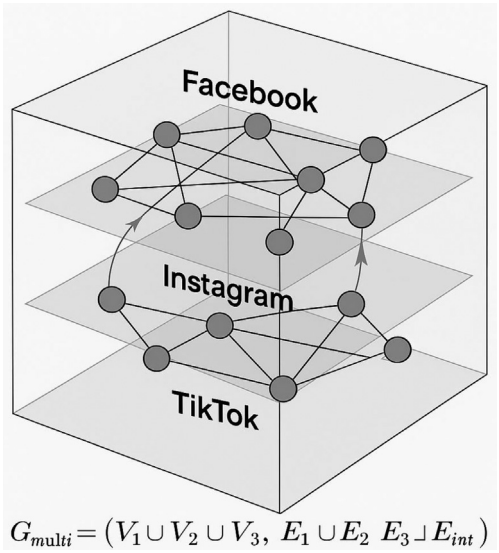


Fig. 1. Visualization of a multilayer model of social networks

Source: compiled by the authors. Each plane represents a separate network (Facebook, Instagram, TikTok), while the transparent arrows show cross-platform connections between the same users.

Social network Facebook, for example, is characterized by a well-defined structure of social groups (such as family, friends, or professional relationships). In this network, group interactions, including comments and reposts, are especially important. As a result, the analysis typically focuses on node clustering and centrality.

A traditional social graph (directed, often bidirectional to represent mutual friendship) is best suited for this purpose. Using graph models, it is possible to analyze not only friendship connections between users (e.g., to identify influential individuals or friend clusters), but also additional interactions (such as likes, comments, or shared group memberships), which allows researchers to determine key influencers and the structure of social ties.

Examples of such interaction graphs are presented in Fig. 3. Visualization tools such as Gephi, NetworkX (Python), and Pajek are commonly used for further analysis of Facebook network interactions.

Зазначимо, It should be noted that the primary goal of analyzing the structure of the Facebook network using graph models is to identify social groups, determine key users, and study communication patterns. To achieve this, several groups of methods are commonly applied:

Centrality analysis methods, which help identify the most important nodes in the Facebook social graph and understand which users have the greatest influence on communication and information dissemination;

Clustering and community detection methods [7, pp. 508–530], used to reveal tightly-knit groups of users most closely connected to each other;

Information diffusion analysis methods, which make it possible to understand how informational or viral content spreads across the network [6].

The social network Instagram is centered around visual content, which largely defines the dynamics of user interaction. Its users can follow others without mutual consent, and interactions (likes, saves, comments) matter more than the mere act of following.

Therefore, the graph that represents user interactions in Instagram is typically directed, one-sided (following ≠ mutual connection), and less dense than that of Facebook. An example of such a graph is shown in Fig. 4.

This type of visualization allows for: identifying influential users, especially those with a large number of followers; detailed analysis of the intensity of interactions; determining which accounts to recommend for following.

Software tools commonly used to build follow graphs in Instagram include Neo4j, Tableau, and Python libraries such as Scikit-learn and NetworkX.

Among the most effective methods for analyzing Instagram are popularity analysis, used to identify the most influential accounts in the network, the most active users, and how audience engagement is formed, graph clustering, used to divide users into groups based on common interests, behavior, and interaction, content and hashtag analysis [6], used to examine post texts to identify the most discussed topics among users.

The key characteristic of the TikTok social network is algorithmic virality. User interactions occur according to specific recommendation algorithms, which causes content to spread faster than in Facebook or Instagram. Moreover, direct connections between users are not required – viral content often reaches audiences beyond a user's follower base.

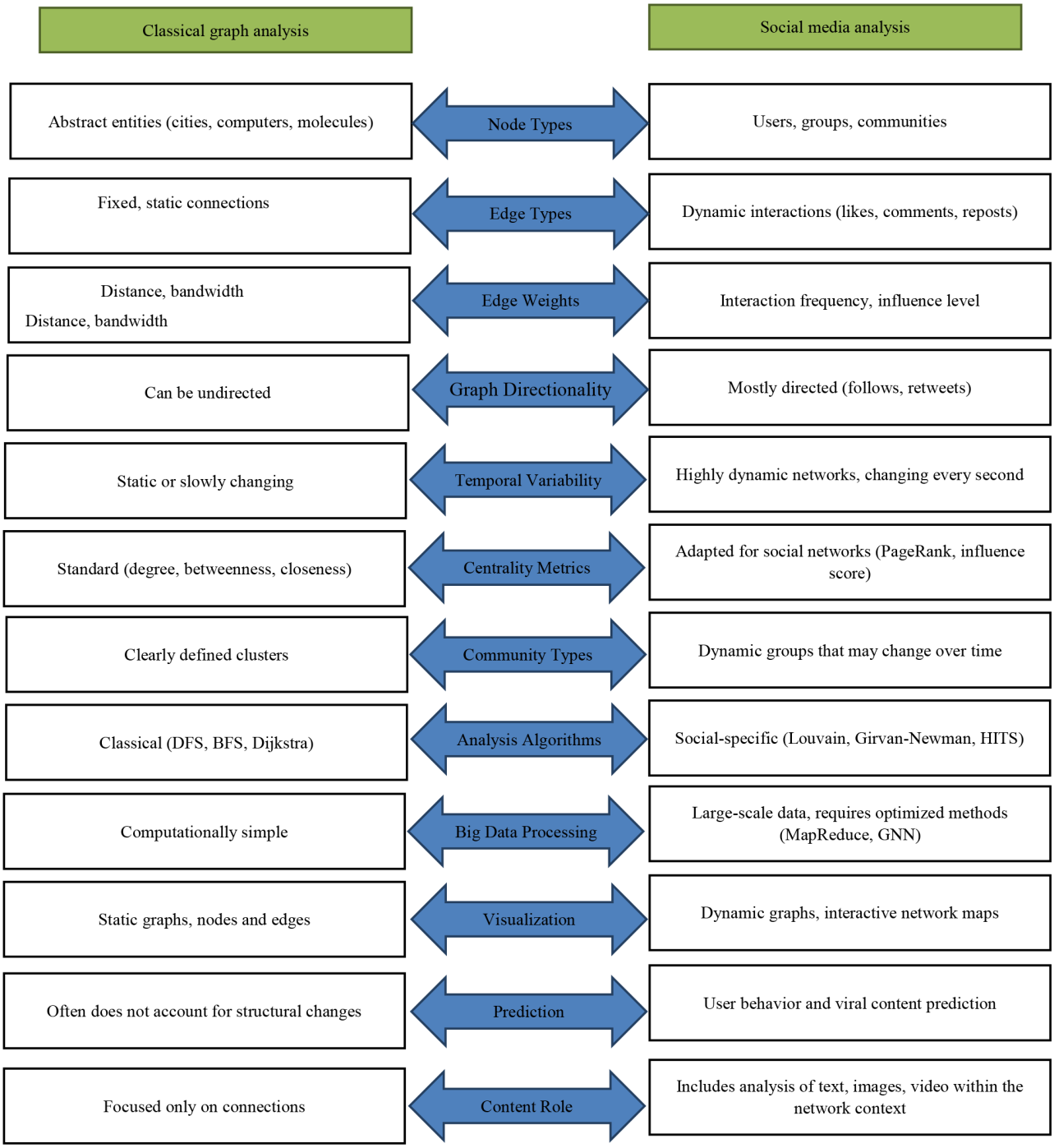


Fig. 2. Adaptation of graph theory to social network analysis

Source: compiled by the authors based on [6].

To represent user interactions on this platform, a dynamic directed graph is used. Such a model makes it possible to identify the originator of viral content, study the cascade of dissemination (how videos travel from one user to another), improve clustering algorithms for recommending videos to similar audiences.

An example of a viral content dissemination graph for TikTok is shown in Fig. 5. Tools used for its construction include TensorFlow, PyTorch, D3.js, and NetworkX.

For broader analysis of this network, the following methods are commonly applied [6]: (1) virality analysis – tracking chain reactions to see how videos go viral and through which users, (2) anomaly and bot detection – identifying suspicious activities, such as the use of bots or artificially inflated views/likes, (3) recommendation system analysis – determining which videos receive more reach and why.

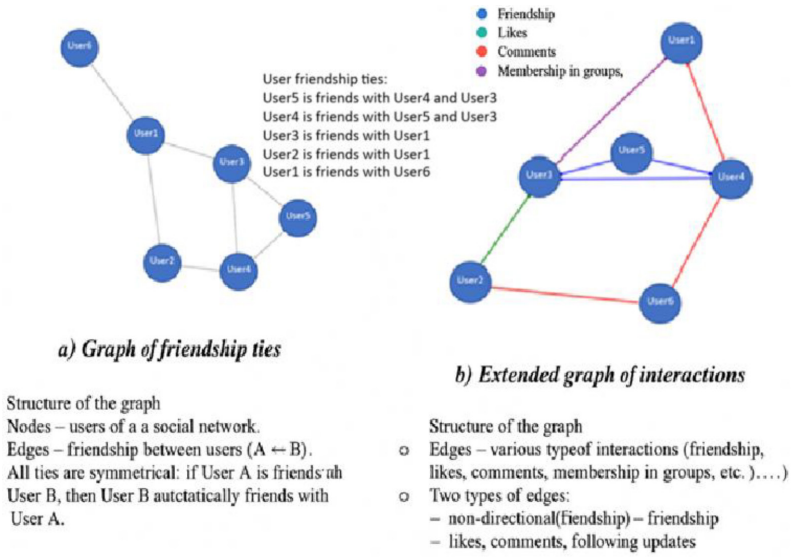


Fig. 3. Examples of interaction graphs for the Facebook social network

Source: compiled by the authors

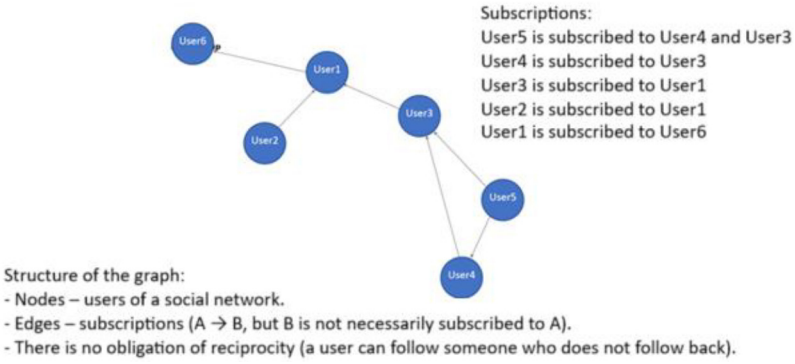


Fig. 4. Example of a follow graph for the Instagram social network

Source: compiled by the authors

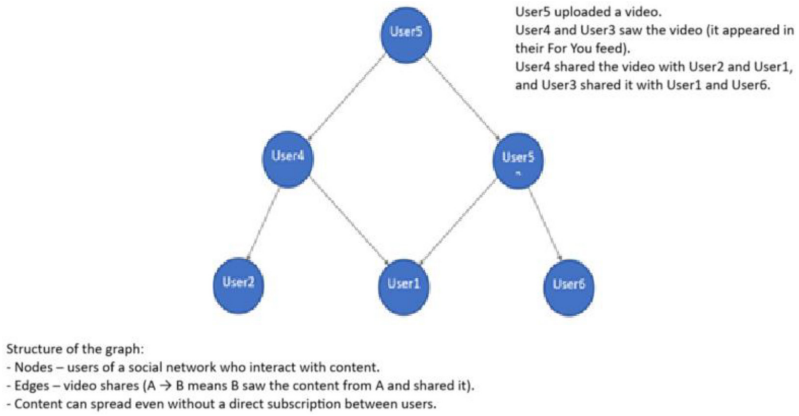


Fig. 5. Example of a viral content dissemination graph for the TikTok social network

Source: compiled by the authors

The structure and functioning of LinkedIn can be represented by a professional social graph, which is directed, hierarchical, and often one-way (subscriptions, corporate connections). This is because the platform reflects professional contacts, corporate networks, and career-related interactions.

In this network, the weights of connections (such as endorsements, recommendations, or interaction levels) are crucial. The following types of graphs can be used to analyze the structure of LinkedIn – directed graph – modeling

friend requests or subscriptions, undirected graph – showing mutual professional contacts, centrality graph – identifying the most influential users in the network, community graph – helping to detect professional groups through clustering. Examples of such graphs are presented in Fig. 6.

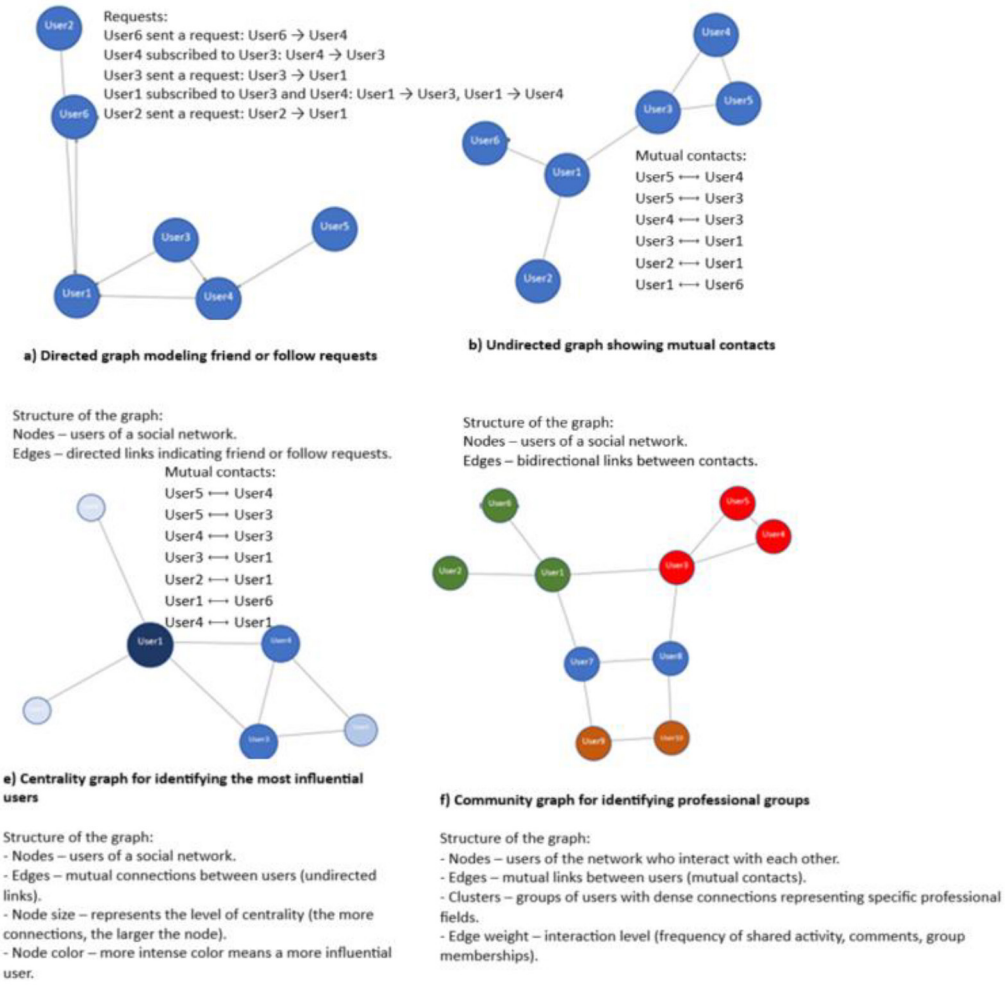


Fig. 6. Examples of interaction graphs for the LinkedIn social network

Source: compiled by the authors

The LinkedIn social network is analyzed using graph-based models of career growth and influence, including:

- Identification of authoritative users and hubs using the HITS algorithm;
- Evaluation of influence levels within the professional network using the Prestige Score method;
- Detection of professional communities and corporate groups using Graph Clustering techniques [6].

As we can see, graph theory can be applied to the structural analysis of any social network, but the structure of the graph itself and the methods of analysis will depend on the nature of user interactions within that network:

- In Facebook, the focus is on community detection and identifying influential users through mutual friendship ties;
- In Instagram, the emphasis is on analyzing visual content and user engagement through follows and likes;
- In TikTok, the primary concern is modeling the real-time viral spread of content;
- In LinkedIn, the analysis centers around professional connections, career opportunities, and corporate networks.

The proposed methodology for selecting graph models of social networks, taking into account the dynamics of their multilevel connections and the nature of user interactions, is presented in Table 1.

The outlined features of applying graph theory to the analysis of the structure of the most popular social networks enable more efficient use of this toolkit for: 1) ensuring cybersecurity by detecting fraudulent accounts, disinformation campaigns, and bot networks based on analyzing user connections; 2) serving political interests by incorporating trends in public opinion (political analytics); 3) enhancing customer interaction through behavioral analysis and personalized marketing strategies; 4) improving social network algorithms. Clearly, the primary stakeholders in such analysis are government authorities, local municipalities, businesses (both public and private sector), and society at large (political parties, individual users, etc.).

Table 1

Features of Social Network Analysis Through the Lens of Graph Theory

Graph Structure	Types of Connections and Temporal Variability	Nature of Interactions	Analysis Features	Big Data Processing
Facebook				
Directed graph, often bidirectional. Nodes: users, pages, groups. Edges: mutual friendships, one-way subscriptions, group memberships. Edge weights: interaction frequency, number of mutual friends. Directionality: mixed (friendship – undirected, subscriptions – directed)	Friendships (two-way), reactions, comments, group activity. **Variability**: moderate (connections change gradually)	Detection of communities and influential users through friendship ties	Analysis of clearly structured communities and user influence. **Methods**: Louvain, Girvan-Newman (group clustering). **Prediction**: long-term connections, user influence	Large volume but structured data. **Visualization**: static and dynamic community graphs
Instagram				
Directed, one-way graph. Nodes: users, business accounts. Edges: follows, comments, likes, hashtags. Edge weights: interaction frequency (likes, comments, DMs). Directionality: present (follows, interactions)	One-way follows, likes, comments, stories. **Variability**: dynamic (users frequently follow/ unfollow)	Analysis of visual content and engagement via likes and follows	Awareness of interaction value (likes, saves), analysis of content-based communities. **Methods**: community detection, engagement graphs. **Prediction**: content popularity, changes in follows	High activity, many interactions. **Visualization**: dynamic interaction networks
TikTok				
Dynamic directed graph. Nodes: users, content creators, trends. Edges: follows, comments, likes, shares. Edge weights: algorithmic recommendations, engagement level. Directionality: present (recommendation system, follows)	Follows, reactions, shares, views. **Variability**: very dynamic (connections update every second)	Real-time analysis of viral content dissemination	Analysis of recommendation algorithm impact, viral spread tracking. **Methods**: Graph Neural Networks, Temporal Graphs. **Prediction**: virality of content, trend dynamics	Extremely large volume, requires fast data processing. **Visualization**: trending graphs, content impact heatmaps
LinkedIn				
Directed, hierarchical graph. Nodes: users, companies, job posts, groups. Edges: mutual connections, one-way follows, endorsements, corporate links. Edge weights: communication frequency, strength of professional ties, endorsements. Directionality: present (user-company-job relationships)	Professional contacts (one- or two-way), endorsements, recommendations, corporate connections. **Variability**: slow (connections are long-term but can evolve)	Modeling professional connections, analyzing career paths and corporate networks	Study of professional ties, career development evaluation **Methods**: Graph clustering, HITS, authority scoring. **Prediction**: career growth, job recommendations, professional influence	High structural consistency, text data analysis (resumes, job descriptions). **Visualization**: professional network maps, career path graphs

Source: compiled by the authors

Data sources for this analysis may include: platform data from the social networks themselves; data from electronic communication platforms (email, forums, chats); internal organizational data (meeting logs, communication records); survey results (social ties and interactions gathered through custom questionnaires); public open data repositories..

The methodology described above can also be effectively applied to track the activity of a single user across different social networks. For instance, in cybersecurity systems, this would make it possible to detect fake accounts, monitor coordinated information campaigns, and study how a single user influences audiences across multiple platforms. This requires building a multigraph or multilayer network model, where each layer represents a separate platform (e.g., Facebook, Twitter, Instagram). Each instance of a person on a platform is represented as a separate node within that layer. Interlayer edges indicate the user's presence across multiple platforms.

A user's activity across platforms can then be analyzed and compared by examining: the number and type of connections formed; frequency of appearances in content streams; the intended audience; time intervals of activity.

Together, these metrics enable behavioral comparison across networks, where the user may behave differently on each platform (sometimes under different usernames or pseudonyms).

Even if usernames differ, user identity can still be established using: 1) profile similarity algorithms – matching based on content style, posting time, and formatting patterns; 2) graph matching algorithms – identifying nodes across graphs likely representing the same person; 3) shared environment analysis – comparing structural similarities of user connections across networks.

Stages of Tracking Multi-Platform User Activity Using Graph Theory.

Stage I: Structured Data Collection from Each Platform

Via social network APIs (e.g., Twitter API, Facebook Graph API, Instagram Graph API), gather:

- user profiles (ID, name, username, email/phone);
- friends/followers list;
- posts, likes, reposts, comments, activity timestamps. If APIs are restricted, web scraping tools (e.g., BeautifulSoup, Selenium, Scrapy) can be used.

Stage II: Multilayer Graph Construction

Build a multilayer graph model where:

- Each layer = one platform;
- Nodes = user profiles;
- Interlayer edges = hypothesized matches of the same user across layers. Tools: networkx, igraph, graph-tool, Neo4j.

Stage III: User Matching

Apply algorithms to determine if profiles from different layers belong to the same user:

1. Heuristic matching (similar names, emails, posting style, image hashes);
2. Graph matching techniques: Node similarity, Label Propagation, Entity resolution;
3. Machine learning approaches for comparing vectorized profile representations.

Stage IV: Visualization and Analysis

Visualize the graphs with tools like Gephi, Cytoscape, Plotly, or networkx + matplotlib. Analyze for centrality, clustering, engagement level, activity dynamics, and influential nodes.

The outcome is a multi-platform user activity map, applicable in:

- behavioral and influence analysis;
- personalized recommendations or cybersecurity protocols;
- sociological, marketing, and information-analytical research..

The use of graph theory in analyzing social network structures has significant practical value in the context of cybersecurity. It enables the identification of anomalous interaction structures that may indicate botnets or coordinated disinformation campaigns. By building and analyzing user interaction graphs (reposts, comments, mentions), it becomes possible to detect clusters of accounts with high-intensity, uniform activity – a potential sign of manipulation.

In the political context, such an analytical approach allows for optimizing communication channels and forecasting public reactions to events. For instance, analyzing hashtag propagation (e.g., #elections2025, #reforms) via information graphs helps identify influence hubs and the users shaping public opinion.

In the business context, constructing interaction graphs in Instagram or TikTok helps identify users with small but highly engaged audiences – crucial for targeting advertising campaigns, improving marketing performance, and optimizing spending.

Conclusions

As a result of the conducted research, a formalized methodology for graph-based analysis of social networks was proposed, accounting for multilevel user interactions and their dynamic characteristics. The introduction of adjacency matrices and interaction weighting made it possible to describe the connection structure among users across platforms more precisely.

The proposed multilayer network model effectively addresses the task of identifying a user across multiple platforms simultaneously. This enables analysis of multi-platform activity, detection of hidden interconnections, and formation of a comprehensive activity profile.

The use of clustering and centrality algorithms (Louvain, Girvan-Newman, HITS) within this framework has proven effective in detecting influential user groups, bot networks, and disinformation campaigns. The study showed that combining structural and temporal parameters enhances the accuracy of predicting social phenomena and user behavior.

Thus, adapting graph models to the specifics of different social platforms significantly extends the analytical capabilities for researchers, businesses, government institutions, and civil society organizations in cybersecurity, marketing, sociology, and information policy.

Bibliography

1. Albert-László Barabási. Network Science. Cambridge University Press. 2016. 475 p.
2. Diestel R. Graph Theory, Electronic Edition. NY: Springer-Verlag, 2005. C. 422.
3. Duncan J. Watts. Small Worlds: The Dynamics of Networks between Order and Randomness. Princeton University Press, 1999. 280 pp.
4. Duncan J. Watts. Six Degrees: The New Science of Networks. New York: Gardner's Books, 2003. 386 p.
5. Milgram Stanley. The Small World Problem. *Psychology Today*. 1967. Vol. 2. pp. 60–67.
6. Stanley Wasserman, Katherine Faust Social Network Analysis: Methods and Applications. Cambridge University Press, 1994. 825 p.

7. Staudt C. L., et al. NetworKit: A toolkit for large-scale complex network analysis, NetworkScience, vol. 4, no. 4, pp. 508–530, 2016. DOI: 10.1017/nws.2016.20

8. Гізун А. І., Гріга В. С. Аналіз деяких відомих моделей поширення інформації в соціальних мережах в аспекті інформаційного протиборства. *Проблеми інформатизації та управління*. 1(77)'2024. С. 4–12. URL: https://www.researchgate.net/publication/383556791_Analiz_deakih_vidomih_modelej_posirenna_informacii_v_socialnih_merezah_v_aspekti_informacijnogo_protiborstva

9. Використання соціальних мереж: посібник. Київ: Департамент преси і публічної інформації Консультативної місії ЄС в Україні, 2020. 47 с. URL: https://www.euam-ukraine.eu/wp-content/uploads/2020/09/Working-with-Social-Media-Compendium-UKRAINIAN-AUGUST-2020-FOR-PUBLICATION.pdf

10. Дідик Л. А. Механізми функціонування соціальних мереж. *Соціальні технології: актуальні проблеми теорії та практики*. 2018. Вип. 77. С. 95–105.

11. Кузьменко І. М. Теорія графів: навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 71 с. URL: https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/fb0a4251-74d9-470b-88da-71abb4e85f93/content

12. Ланде Д. В., Субач І. Ю. Візуалізація та аналіз мережевих структур: Навч. посібник. К. : ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 79 с.

13. Мазуренко В. В., Штовба С. Д. Огляд моделей аналізу соціальних мереж. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. № 2. С. 62–74.

14. Синєглазов В.М., Хоцянівський В. П. Аналіз соціальних мереж, як інструмент перевірки достовірності інформації. С. 19–13. URL: https://www.researchgate.net/publication/358559034_Analiz_socialnih_merez_ak_instrument_perevirki_dostovirnosti_informacii

15. Снарський А. О., Ланде Д. В., Субач І. Ю. Основи теорії складних мереж: навч. пос. Київ : ТОВ «Інжиніринг», 2023. 225 с.

16. Шушура О. М., Кокідько Б. С. Моделювання соціальних мереж з використанням теорії графів та нечіткої логіки. *Проблеми розвитку та вдосконалення єдиної національної системи зв'язку*. *Зв'язок*. № 5. 2024. С. 12–17. URL: https://con.dut.edu.ua/index.php/communication/article/view/2804/2693

References

1. Albert-László, Barabási (2016). Network Science. 475 p.

2. Diestel, R (2005). Graph Theory, Electronic Edition. 422 p.

3. Duncan J, Watts (1999). Small Worlds: The Dynamics of Networks between Order and Randomness. 280 p.

4. Duncan J., Watts (2003). Six Degrees: The New Science of Networks. 386 p.

5. Milgram, Stanley (1967). The Small World Problem. *Psychology Today*. Vol. 2. pp. 60–67.

6. Stanley, Wasserman, Katherine, Faust (1994) Social Network Analysis: Methods and Applications. 825 p.

7. Staudt, C. L., et al. (2016). NetworKit: A toolkit for large-scale complex network analysis, NetworkScience, vol. 4, no. 4, pp. 508–530.

8. Hizun, A. I., Hriha, V.S (2024). Analiz deiakykh vidomykh modelei poshyrennia informatsii v sotsialnykh merezhakh v aspekti informatsiinoho protyborstva [Analysis of some well-known models of information dissemination in social networks in the aspect of information confrontation]. *Problemy informatyzatsii ta upravlinnia – Problems of informatization and management*. no. 1(77). pp. 4–12. Available at: https://www.researchgate.net/publication/383556791_Analiz_deakih_vidomih_modelej_posirenna_informacii_v_socialnih_merezah_v_aspekti_informacijnogo_protiborstva (accessed 16 March 2023) [in Ukrainian].

9. Vykorystannia sotsialnykh merezh [Using social media]. Available at: https://www.euam-ukraine.eu/wp-content/uploads/2020/09/Working-with-Social-Media-Compendium-UKRAINIAN-AUGUST-2020-FOR-PUBLICATION.pdf (accessed 16 March 2023) [in Ukrainian]

10. Didyk, L. A. (2018). Mekhanizmy funktsionuvannia sotsialnykh merezh [Mechanisms of functioning of social networks]. *Sotsialni tekhnolohii: aktualni problemy teorii ta praktyky – Social technologies: current problems of theory and practice*. no. 77. pp. 95–105. [in Ukrainian].

11. Kuzmenko, I.M. (2020). *Teoriia hrafiv [Graph Theory]*. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 71 p. Available at: https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/fb0a4251-74d9-470b-88da-71abb4e85f93/content (accessed 15 March 2023) [in Ukrainian].

12. Lande, D.V., Subach, I.Iu. (2020). *Vizualizatsiia ta analiz merezhevykh struktur [Visualization and analysis of network structures]*. K. : ISZZI KPI im. Ihoria Sikorskoho, 79 p. [in Ukrainian].

13. Mazurenko, V. V., Shtovba, S. D. (2015). Ohliad modelei analizu sotsialnykh merezh [Review of social network analysis models]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*. no. 2. pp. 62–74. [in Ukrainian]

14. Syniehlazov, V. M., Khotsianivskyi, V. P. (2021). Analiz sotsialnykh merezh, yak instrument perevirky dostovirnosti informatsii [Analysis of social networks as a tool for checking the reliability of information]. Available at:

https://www.researchgate.net/publication/358559034_Analiz_socialnih_merez_ak_instrument_perevirki_dostovirnosti_informacii (accessed 19 March 2023) [in Ukrainian]

15. Snarskyi, A. O., Lande, D. V., Subach, I. Iu. (2023). Osnovy teorii skladnykh merezh [Fundamentals of the theory of complex networks]. Kyiv : TOV “Inzhynirynh”, 225 p. [in Ukrainian].

16 Shushura, O. M., Kokidko, B. S. (2024). Modeliuvannia sotsialnykh merezh z vykorystanniam teorii hrafiv ta nechitkoi lohiky [Shushura O.M., Kokidko B.S. Modeling social networks using graph theory and fuzzy logic]. *Problemy rozvytku ta vdoskonalennia yedynoi natsionalnoi systemy zviazku. Zviazok – Problems of development and improvement of a unified national communication system. Communication*. no 5. pp. 12–17. Available at: https://con.dut.edu.ua/index.php/communication/article/view/2804/2693 (accessed 16 March 2023) [in Ukrainian].

УДК 004.932 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.48

В. Г. ШЕРСТЮК
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри програмних засобів і технологій
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-9096-2582

С. А. ЩЕРБАНЮК
аспірант
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0001-5472-8019

СЦЕНАРНО-ПРЕЦЕДЕНТНІ ПІДХОДИ ДО КООРДИНАЦІЇ ГЕТЕРОГЕННИХ АНСАМБЛІВ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ

У статті розглянуто актуальну проблему координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів (БПА) в умовах високої динамічності та невизначеності. Запропоновано підхід до координації на основі сценарно-прецедентної моделі, що поєднує елементи централізованого, децентралізованого та гібридного управління. Особливу увагу приділено питанню ефективного розподілу завдань між різними типами БПА з урахуванням їхніх унікальних можливостей та обмежень. Метою дослідження є формування гнучкого та адаптивного підходу, здатного забезпечити ефективну взаємодію між агентами з урахуванням їхніх різнорідних характеристик.

У межах дослідження передбачається створення бази прецедентів, яка дозволить використовувати накопичений досвід для вибору релевантних сценаріїв виконання місій. Запропоновано адаптивний алгоритм координації, що базується на поєднанні методів машинного навчання (нейронні мережі) та підкріпленого навчання для реалізації динамічної адаптації в реальному часі.

Запропонована архітектура також передбачає механізми комунікації та обміну інформацією між окремими БПА для забезпечення узгодженості дій. Окремо досліджується вплив якості та обсягу бази прецедентів на ефективність координації. Алгоритм також враховує можливість виникнення непередбачуваних ситуацій та необхідність оперативного перепланування дій.

Заплановане моделювання дозволяє порівняти ефективність розробленого підходу з існуючими методами, зокрема за параметрами швидкості прийняття рішень та стійкості до відмов.

У результаті дослідження продемонстровано, що використання сценарно-прецедентного підходу сприяє зниженню часу на прийняття рішень, підвищенню гнучкості системи та її стійкості в умовах змінного середовища. Отримані висновки підтверджують доцільність подальшого розвитку запропонованої моделі, зокрема шляхом розширення бази прецедентів та вдосконалення алгоритмів адаптації.

Ключові слова: *гетерогенні безпілотні апарати, координація агентів, сценарно-прецедентний підхід, адаптивний алгоритм, машинне навчання, підкріплене навчання, база прецедентів, децентралізоване управління, автономні системи, штучний інтелект.*

V. G. SHERSTYUK
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Software and Technologies
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-9096-2582

S. A. SHCHERBANIUK
Postgraduate Student
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0001-5472-8019

SCENARIO-PRECEDENT APPROACHES TO THE COORDINATION OF HETEROGENEOUS UNMANNED AERIAL VEHICLE ENSEMBLES

The article addresses the pressing issue of coordinating heterogeneous ensembles of unmanned aerial vehicles (UAVs) under conditions of high dynamism and uncertainty. A coordination approach based on a scenario-precedent model is proposed, which integrates elements of centralized, decentralized, and hybrid control. Particular attention is paid to the effective distribution of tasks among different types of UAVs, considering their unique capabilities and limitations. The objective of the study is to develop a flexible and adaptive approach capable of ensuring effective interaction among agents with diverse characteristics.

The research envisions the creation of a precedent database that will enable the use of accumulated experience to select relevant mission execution scenarios. An adaptive coordination algorithm is proposed, based on a combination of machine learning methods (neural networks) and reinforcement learning, to implement real-time dynamic adaptation.

The proposed architecture also includes mechanisms for communication and information exchange between individual UAVs to ensure coherence of actions. The influence of the quality and volume of the precedent database on coordination efficiency is separately analyzed. The algorithm also considers the possibility of unforeseen situations and the need for rapid replanning of actions.

The planned simulation allows for a comparative analysis of the effectiveness of the developed approach against existing methods, particularly in terms of decision-making speed and fault tolerance.

The results of the study demonstrate that the use of the scenario-precedent approach contributes to reducing decision-making time, increasing system flexibility, and enhancing resilience in a dynamic environment. The findings confirm the relevance of further development of the proposed model, particularly by expanding the precedent database and improving the adaptation algorithms.

Key words: *heterogeneous unmanned aerial vehicles, agent coordination, scenario-precedent approach, adaptive algorithm, machine learning, reinforcement learning, precedent database, decentralized control, autonomous systems, artificial intelligence.*

Постановка проблеми

Розвиток технологій безпілотних апаратів (БПА) представляє собою постійний процес удосконалення цих автономних систем у різних аспектах їхнього функціонування, від характеристик та особливостей технічного обладнання до алгоритмів управління та використання їх у різних галузях.

Цей розвиток базується на поєднанні ряду факторів, включаючи апаратні та програмні засоби, а також розвиток штучного інтелекту, навчання машин, технологій зв'язку та сенсорної техніки.

Технологічні досягнення у галузі безпілотних апаратів охоплюють широкий спектр аспектів, що включають у себе поліпшення автономності, точності навігації, розширення функціоналу, збільшення часу польоту та навантаження, а також забезпечення високого рівня безпеки в їхньому використанні.

Одним з ключових аспектів у розвитку технологій БПА є постійне удосконалення апаратного забезпечення. Це включає в себе вдосконалення матеріалів, використання більш продуктивних й ефективних елементів живлення, покращення сенсорної бази та розробку більш продуктивних систем комунікації, що дозволяють апаратам працювати в реальному часі та забезпечувати передачу великого обсягу даних.

Однак, не менш важливий є розвиток програмного забезпечення, яке стає все складнішим та адаптивним. Розробка нових алгоритмів управління, що базуються на штучному інтелекті та нейронних мережах, дозволяє апаратам аналізувати великі обсяги даних, приймати рішення в реальному часі та автоматично адаптуватися до змінних умов.

Варто зазначити, що розвиток безпілотних апаратів відбувається в контексті активного зростання сфери штучного інтелекту. Моделі машинного навчання та нейронні мережі використовуються для навчання апаратів розпізнавати об'єкти, вирішувати завдання та адаптуватися до нових умов. Технологічний прогрес також сприяє розвитку мініатюризації, тобто створенню компактних та легких апаратів з великими функціональними можливостями. Це дозволяє створювати апарати, які можуть працювати в умовах, де раніше це було складно або неможливо. У плані апаратів, які працюють в різних галузях, розвиток технологій БПА призводить до їхнього застосування у сферах від авіації та транспорту до наукових досліджень, землеробства, моніторингу навколишнього середовища, рятувальних операцій та військових дій.

Завдання координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів (БПА) набуло великої актуальності на сучасному етапі розвитку техніки і мистецтва управління. БПА стали невід'ємною складовою для виконання різноманітних завдань, від спостереження до військових місій. Застосування БПА охоплює сфери, де необхідна висока гнучкість, точність та ефективність, що робить їх важливими елементами сучасної технологічної інфраструктури.

У контексті цієї роботи агенти – це окремі безпілотні апарати, які діють автономно або взаємодіють з іншими в межах ансамблю для досягнення спільної мети.

Сучасні підходи до координації гетерогенних ансамблів базуються на детерміністичних або стохастичних принципах, які мають значні недоліки в умовах високої невизначеності та динамічних змін.

Детерміністичні підходи до координації БПА передбачають точне планування дій на основі попередньо визначених правил і сценаріїв. Ці підходи добре працюють у відносно стабільних середовищах, але часто не можуть забезпечити достатньої гнучкості в умовах непередбачуваних змін. Зіткнувшись із несподіваними перешкодами або змінними умовами, детерміністичні алгоритми не здатні оперативно адаптувати поведінку ансамблю, що призводить до зниження ефективності виконання завдань.

Стохастичні методи, навпаки, використовують імовірнісні моделі для прогнозування поведінки системи та прийняття рішень. Вони дозволяють агентам ансамблю адаптуватися до змін середовища, але при цьому потребують

значних обчислювальних ресурсів для моделювання та прогнозування можливих сценаріїв. Крім того, велика кількість варіантів розвитку подій робить стохастичні методи залежними від якості і кількості вхідних даних, що може призводити до неточностей або затримок у прийнятті рішень.

Гетерогенність ансамблів БПА додає додатковий рівень складності до завдання координації. Різні типи безпілотних апаратів можуть мати різні технічні характеристики, такі як швидкість, радіус дії, вантажопідйомність, а також різні можливості щодо виконання завдань. Це вимагає від координаційних алгоритмів врахування цих відмінностей, що ще більше ускладнює розробку універсального підходу до управління такими системами.

З огляду на ці виклики, стає очевидною необхідність розробки нових методів координації, які могли б ефективно працювати в умовах невизначеності та враховувати гетерогенність апаратів.

Такі методи повинні забезпечувати гнучкість у прийнятті рішень, можливість адаптації до змін середовища в режимі реального часу, а також враховувати різні технічні характеристики та можливості безпілотних апаратів. Запропоновані підходи мають бути здатними використовувати наявний досвід виконання завдань, забезпечувати швидке прийняття рішень та високу стійкість системи до відмов окремих елементів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасній науковій літературі координація гетерогенних безпілотних апаратів (БПА) є однією з ключових проблем, що активно досліджується. Існуючі підходи до управління такими системами умовно поділяються на централізовані, децентралізовані та гібридні. Централізовані підходи демонструють ефективність у відносно простих і стабільних умовах, забезпечуючи управління всіма безпілотними апаратами з одного центрального вузла. Такий підхід дозволяє реалізувати чіткий контроль та координацію, що є важливим для виконання задач із високими вимогами до точності управління. Однак, ці підходи є вразливими до відмов центрального елемента, що може призвести до тотальної втрати керованості системою. У випадку відмови центрального контролера, усі інші безпілотні апарати втрачають координацію, що значно знижує надійність системи у складних місіях, де важлива стійкість до відмов [2].

Дослідження в області централізованих систем управління показують, що вони можуть бути ефективними для завдань із передбачуваними сценаріями, таких як моніторинг стабільних об’єктів або виконання місій із чітко визначеними параметрами [2]. Проте, у динамічних середовищах, де зміни можуть відбуватися раптово і бути непередбачуваними, централізовані підходи виявляються неефективними через їхню негнучкість та залежність від наявності безперервного зв’язку з центральним вузлом.

Децентралізовані підходи, з іншого боку, надають системі більшу стійкість, оскільки кожен агент функціонує незалежно, що знижує ризик втрати керованості через відмову одного з елементів. Відсутність єдиного центрального контролера дозволяє забезпечити високу стійкість до відмов та гнучкість в умовах невизначеності. Однак, досягнення узгоджених дій між агентами вимагає складних алгоритмів узгодження та координації. Алгоритми розподіленого консенсусу, як-от ті, що досліджували, можуть забезпечувати узгоджену роботу між агентами, але для цього потрібні значні обчислювальні ресурси. Зокрема, необхідність обміну інформацією та досягнення консенсусу може призводити до суттєвих затримок, особливо у великих системах із численними агентами [1].

Відсутність централізованого управління створює додаткові виклики щодо ефективної координації, оскільки процес узгодження дій між великою кількістю агентів може бути досить тривалим. Підкреслюють, що децентралізовані методи забезпечують стійкість до відмов, але потребують оптимізації для скорочення часу узгодження дій у великих групах [4]. Такі підходи можуть бути корисними в умовах, коли кожен агент повинен швидко реагувати на зміни середовища, але обчислювальні витрати та затримки в координації обмежують їх застосування для великих команд.

Гібридні підходи поєднують переваги централізованого і децентралізованого управління, забезпечуючи як стратегічне планування, так і оперативну гнучкість. Науковці демонструють, що гібридні системи дозволяють використовувати централізоване управління для глобального планування, водночас залишаючи місце для децентралізованих рішень у місцевих операціях [4]. Це підходить для сценаріїв, де необхідно поєднати стратегічну оптимізацію з локальною адаптацією до змінних умов. Проте реалізація таких систем вимагає складної інфраструктури для забезпечення надійного обміну даними між агентами в режимі реального часу, що є істотним недоліком з огляду на витрати ресурсів.

Методи машинного навчання, зокрема підкріпленого навчання, широко застосовуються для адаптації поведінки БПА. Зазначають, що підкріплене навчання дозволяє агентам оптимізувати свою стратегію на основі накопиченого досвіду, що особливо корисно в умовах невизначеності [15]. Однак ці методи вимагають великих обчислювальних ресурсів і тривалого часу для тренування, а також значного обсягу даних для навчання. Також розглядають переваги нейронних мереж у підвищенні адаптивності БПА, але підкреслюють проблему з узагальненням, що може призвести до помилок у непередбачених ситуаціях. Це обмежує застосування методів підкріпленого навчання у місіях, де високі вимоги до надійності та безпеки.

Сценарно-прецедентні методи, які використовують накопичений досвід для прийняття рішень, виглядають як перспективний напрям для вирішення проблем, пов’язаних із гнучкістю та ефективністю координації. Дослідники

показали, що ці методи можуть значно скоротити час прийняття рішень, оскільки використовують прецеденти для швидкої адаптації до нових умов. Це робить сценарно-прецедентні методи ефективними у динамічних середовищах, де швидкість реакції є ключовим фактором успіху місії. Водночас, їхня ефективність залежить від якості і кількості наявних прецедентів, що потребує побудови надійної бази даних із великим обсягом інформації про попередні місії.

Загалом, сучасні підходи до координації гетерогенних ансамблів БПА мають певні обмеження, що підкреслює важливість розробки нових методів, здатних поєднати переваги існуючих підходів та уникати їх недоліків. Вивчення сценарно-прецедентних методів координації відкриває нові можливості для створення більш гнучких, стійких і ефективних систем управління гетерогенними ансамблями безпілотних апаратів у складних і динамічних умовах.

Формулювання мети дослідження

Основна мета даного дослідження полягає у розробці ефективного підходу до координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів на основі сценарно-прецедентного підходу, який поєднує переваги існуючих централізованих, децентралізованих та гібридних методів, зокрема в умовах високої динамічності та невизначеності. Для досягнення цієї мети було визначено наступні завдання:

1. Провести аналіз існуючих методів координації гетерогенних БПА та виявити їх основні недоліки в умовах динамічних змін середовища.
2. Розробити базу прецедентів, що містить дані про успішно виконані місії різного типу, для прискорення процесу прийняття рішень та адаптації до нових умов.
3. Розробити адаптивний алгоритм вибору та адаптації сценаріїв на основі аналізу поточних умов, використовуючи машинне навчання та накопичений досвід виконання місій.
4. Провести симуляційні експерименти для оцінки ефективності запропонованого підходу у порівнянні з існуючими методами, особливо в умовах, де необхідна висока швидкість реакції та стійкість до відмов.

Запропоноване дослідження спрямоване на створення гнучкої та ефективної системи управління гетерогенними ансамблями БПА, що здатна швидко адаптуватися до змін середовища, використовуючи сценарно-прецедентні методи для підвищення ефективності та надійності виконання складних місій.

Викладення основного матеріалу дослідження

Запропонований підхід до координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів базується на сценарно-прецедентних методах, які використовують накопичений досвід для адаптації до нових умов і прийняття рішень у режимі реального часу. Основна ідея полягає у створенні бази прецедентів, яка містить дані про успішно виконані місії, включаючи умови виконання, типи задіяних безпілотних апаратів, використовувані стратегії управління, а також результативність кожної місії. Ця база дозволяє швидко знаходити відповідні сценарії для нових завдань, що суттєво знижує час прийняття рішень і підвищує ефективність роботи системи.

1. Структура сценарно-прецедентного підходу

Сценарно-прецедентний підхід складається з декількох ключових етапів. Перший етап включає збір даних про попередні місії та їх аналіз для формування бази прецедентів. Цей етап передбачає класифікацію місій за різними параметрами, такими як тип завдання, умови виконання, технічні характеристики апаратів та застосовувані стратегії управління. Використовуючи машинне навчання, ці дані аналізуються для визначення найкращих практик та сценаріїв, що можуть бути застосовані у майбутніх місіях.

На другому етапі здійснюється вибір сценарію для нової місії. Цей вибір базується на порівнянні поточних умов із наявними прецедентами в базі. Використовуються алгоритми класифікації та прогнозування для визначення найбільш релевантного прецеденту, що відповідає поточній ситуації. У випадку, якщо точного відповідника не знайдено, система може комбінувати декілька прецедентів або адаптувати існуючий сценарій для найкращого вирішення завдання.

Третій етап передбачає адаптацію вибраного сценарію в режимі реального часу. Для цього використовуються алгоритми підкріпленого навчання, які дозволяють системі самостійно коригувати свої дії на основі зворотного зв'язку із середовищем. Це особливо важливо в умовах динамічних змін, коли початковий сценарій може виявитися неефективним через непередбачені фактори. Таким чином, система забезпечує не тільки вибір оптимального сценарію, але й його постійну адаптацію до змінних умов.

2. Адаптивний алгоритм координації

У межах дослідження планується розробити алгоритм координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів, здатний забезпечити гнучку, стійку та адаптивну взаємодію між агентами в умовах динамічного та непередбачуваного середовища. Його реалізація передбачає поєднання сценарно-прецедентного підходу з інструментами машинного навчання, зокрема нейронними мережами для класифікації та прогнозування, а також методами підкріплення навчання для адаптації дій у режимі реального часу.

Ключовим елементом алгоритму стане база прецедентів, що накопичує досвід виконання попередніх місій. Це дозволить системі швидко знаходити релевантні сценарії та приймати рішення на основі аналогій, значно скорочуючи час реагування. Нейронні мережі використовуватимуться для виявлення закономірностей у даних і вибору оптимальних стратегій, а підкріплене навчання – для корекції дій у відповідь на зміни середовища, забезпечуючи постійну адаптацію системи.

Алгоритм складається з наступних основних компонентів:

– **Збір і обробка даних**: збирання інформації про попередні місії, включаючи успішні стратегії та типи завдань, з метою створення бази прецедентів.

– **Класифікація місій**: використання алгоритмів машинного навчання для класифікації місій та визначення відповідних сценаріїв для нових завдань.

– **Адаптація в режимі реального часу**: застосування підкріпленого навчання для адаптації обраного сценарію відповідно до поточних змін середовища.

– **Оцінка ефективності**: безперервна оцінка ефективності виконання місії на основі зворотного зв'язку та коригування дій для підвищення результативності.

3. Планування експерименту

Для оцінки ефективності запропонованого підходу заплановано серію експериментів, в яких порівнюватимуться різні методи координації гетерогенних ансамблів БПА. Симуляції проводитимуться в умовах високої динамічності середовища, що включатиме раптові зміни умов, відмови окремих апаратів та інші фактори, які можуть впливати на успішність виконання місії. Запропонований сценарно-прецедентний підхід демонструє значне зниження часу на прийняття рішень та підвищення ефективності виконання завдань порівняно з традиційними централізованими та децентралізованими методами.

Висновки

Запропонований сценарно-прецедентний підхід до координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів показав свою ефективність у зменшенні часу на прийняття рішень та підвищенні стійкості системи до відмов окремих елементів. Цей підхід забезпечує здатність системи швидко адаптуватися до змінних умов середовища, що дозволяє ефективніше виконувати завдання, особливо у динамічних та непередбачуваних умовах. У порівнянні з традиційними детерміністичними та стохастичними методами, запропонована система продемонструвала кращу гнучкість та надійність.

Проте, існують певні обмеження, які необхідно враховувати при використанні цього підходу. Одним із таких обмежень є залежність від наявності достатньої кількості прецедентів у базі для забезпечення ефективного вибору сценарію. У випадку виникнення нових або нетипових умов, ефективність системи може знижуватися через відсутність релевантних прецедентів. Крім того, використання методів машинного навчання потребує значних обчислювальних ресурсів для тренування моделей, що може стати обмежувальним фактором у реальному часі.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на вирішення цих обмежень шляхом розширення бази прецедентів, оптимізації алгоритмів машинного навчання для зменшення обчислювальних витрат, а також на вивчення можливостей комбінування різних сценаріїв для підвищення адаптивності системи у непередбачуваних ситуаціях. Такий підхід відкриває нові можливості для створення більш гнучких, надійних та стійких до відмов систем управління гетерогенними ансамблями безпілотних апаратів.

Список використаної літератури

1. Голембо В. А., Мельніков Р. Г. Організація роботи групи безпілотних літальних апаратів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2018. № 905. С. 56–63. URL: https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/4c1f9ca3-fc34-4de0-9e49-a735f35ccdc2/content (дата звернення: 06.05.2025).

2. Smith J., Brown R. Coordination of Heterogeneous UAVs: Challenges and Approaches. *Journal of Robotics*. 2022. Vol. 9. No.314. P. 45–58.

3. Берневек І., Головко О., Роса Т., Корнєєв В., Яремко О. Дослідження та алгоритми інтегрованого керування групою безпілотних літальних апаратів. *Infocommunication technologies and electronic engineering*. 2024. Т. 4. № 2. С. 29–37.

4. Miller T., Garcia F. Reinforcement Learning for Adaptive UAV Coordination. *International Journal of Intelligent Systems*. 2023 Vol. 3. No. 235. P. 96–111.

5. Шерстюк В. Г., Левківський Р. М., Гусєв В. М., Сокол І. В., Доровська І. О. Метод пошуку безпечних траєкторій руху безпілотних апаратів. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2021. № 1. С. 113–125.

6. Додонов О. В. Концептуальне проєктування автоматизованої системи управління групою безпілотних літальних апаратів із використанням методу категорійного аналізу. *Математичні машини і системи: науковий журнал*. 2020. № 4. С. 33–48.

7. Sherstiuk V. G., Zharikova M., Levkivskyi R. M., Husiev V. M., Sokol I. V. Cooperative Collision Avoidance Method for Large Teams of Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology*. 2020 P. 832–837.

8. Бережний О. В. Моделі системи колективної самоорганізації безпілотних літальних апаратів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2024. Т. 2. № 76. С. 47–52.

9. Шерстюк В. Г., Доровська І. В., Левківський Р. М., Гусєв В. М. Оцінка подібності ситуацій в сценарно-прецедентних системах управління: просторові міри. *Вісник Херсонського національного технічного університету.* 2020. Т. 1, № 1. С. 162–174.

10. Шерстюк В. Г., Сокол І. В., Гусєв В. М., Левківський Р. М. Динамічне планування траєкторій руху безпілотних апаратів в процесі виконання складних операцій. *Проблеми інформаційних технологій*. 2020. № 27. С. 7–22.

11. Гусєв В. М., Шерстюк В. Г., Левківський Р. М., Сокол І. В. Модель сценарно-прецедентного керування спільним рухом великих гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів. *Проблеми інформаційних технологій.* 2019. № 25. С. 4–17.

12. Шерстюк В. Г., Левківський Р. М., Гусєв В. М., Сокол І. В. Розподілені моделі синхронізації інформаційних структур ансамблю безпілотних апаратів. *Проблеми інформаційних технологій*. 2019. № 26. С. 7–20.

13. Журавська І. М. Мусієнко М. П. Мобільна система керування гетерогенною рухомою мережею безпілотних апаратів. *Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки ЗСУ*. 2017. № 57. С. 30–40.

14. Chen, J., Zhang, X., Xin, B. & Fang, H. Coordination Between Unmanned Aerial and Ground Vehicles: A Taxonomy and Optimization Perspective. *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 46. № 4. P. 959–972.

References

1. Holembo V. A., Melnykov R. H. (2018) Orhanizatsiia roboty hrupy bezpilotnykh litalnykh aparativ [Organization of the work of an unmanned aerial vehicle group]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika" – Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"*, no. 905, pp. 56–63. Available at: https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/4c1f9ca3-fc34-4de0-9e49-a735f35ccdc2/content (Accessed: 06 May 2025).

2. Smith J., Brown R. (2022) Coordination of Heterogeneous UAVs: Challenges and Approaches. *Journal of Robotics*, Vol. 9, No. 314, pp. 45–58.

3. Bernevek I., Holovko O., Rosa T., Kornieiev V., Yaremko O. (2024) Doslidzhennia ta alhorytmy intehrovanoho keruvannia hrupoiu bezpilotnykh litalnykh aparativ [Research and algorithms of integrated control of a group of UAVs]. *Infocommunication technologies and electronic engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 29–37. [in Ukrainian].

4. Miller T., Garcia F. (2023) Reinforcement Learning for Adaptive UAV Coordination. *International Journal of Intelligent Systems*, Vol. 3, No. 235, pp. 96–111.

5. Sherstiuk V. H., Levkivskyi R. M., Husiev V. M., Sokol I. V., Dorovska I. O. (2021) Metod poshuku bezpechnykh traiektorii rukhu bezpilotnykh aparativ [Method of safe trajectory search for UAVs]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, No. 1, pp. 113–125. [in Ukrainian].

6. Dodonov O. V. (2020) Kontseptualne proiektuvannia avtomatyzovanoi systemy upravlinnia hrupoiu BPLA iz vykorystanniam metodu katehoriinoho analizu [Conceptual design of an automated UAV group control system using categorical analysis method]. *Matematychni mashyny i systemy*, No. 4, pp. 33–48. [in Ukrainian].

7. Sherstiuk V. G., Zharikova M., Levkivskyi R. M., Husiev V. M., Sokol I. V. (2020) Cooperative Collision Avoidance Method for Large Teams of Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology*, pp. 832–837.

8. Berezhnyi O. V. (2024) Modeli systemy kolektyvnoi samoorganizatsii BPLA [Models of a collective self-organization system for UAVs]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, Vol. 2, No. 76, pp. 47–52. [in Ukrainian].

9. Sherstiuk V. H., Dorovska I. V., Levkivskyi R. M., Husiev V. M. (2020) Otsinka podobnosti sytuatsii v stsenarno-pretcedentnykh systemakh upravlinnia: prostorovi miry [Similarity estimation of situations in scenario-precedent control systems: spatial metrics]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, Vol. 1, No. 1, pp. 162–174. [in Ukrainian].

10. Sherstiuk V. H., Sokol I. V., Husiev V. M., Levkivskyi R. M. (2020) Dynamichne planuvannia traiektorii rukhu BPLA v protsesi vykonannia skladnykh operatsii [Dynamic UAV trajectory planning during complex operations]. *Problemy informatsiinykh tekhnolohii*, No. 27, pp. 7–22. [in Ukrainian].

11. Husiev V. M., Sherstiuk V. H., Levkivskyi R. M., Sokol I. V. (2019) Model stsenarno-pretcedentnoho keruvannia spilnym rukhom hromad BPLA [Scenario-precedent model for coordinated movement of large heterogeneous UAV teams]. *Problemy informatsiinykh tekhnolohii*, No. 25, pp. 4–17. [in Ukrainian].

12. Sherstiuk V. H., Levkivskyi R. M., Husiev V. M., Sokol I. V. (2019) Rozpodileni modeli synkhronizatsii informatsiinykh struktur ansambliv BPLA [Distributed models of synchronizing UAV ensemble information structures]. *Problemy informatsiinykh tekhnolohii*, No. 26, pp. 7–20. [in Ukrainian].

13. Zhuravska I. M., Musiienko M. P. (2017) Mobilna systema keruvannia heterohennoiu rukhomoju merezheiu BPLA [Mobile control system of a heterogeneous UAV network]. *Zbirnyk naukovykh prats Tsentralnoho NDI ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky ZSU*, No. 57, pp. 30–40. [in Ukrainian].

14. Chen J., Zhang X., Xin B., Fang H. (n.d.) Coordination Between Unmanned Aerial and Ground Vehicles: A Taxonomy and Optimization Perspective. *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 46, No. 4, pp. 959–972.

СОЦІАЛЬНІ ТА ПОВЕДІНКОВІ НАУКИ

УДК 1:37. 3:337/378 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.49

Г. Д. БЕРЕГОВА
доктор філософських наук, професор,
професор кафедри економіки, підприємництва та економічної безпеки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-2418-7178

ФІЛОСОФСЬКО-ОСВІТНІЙ ПІДХІД ДО ФОРМУВАННЯ СОЦІАЛЬНО-КОМУНІКАТИВНИХ НАВИЧОК СОЦІАЛЬНОГО ПРАЦІВНИКА

У роботі розкрито філософсько-освітній підхід до формування соціально-комунікативних навичок соціальних працівників та висловлено переконання, що інтеграція філософських ідей із цільовими освітніми практиками є ключем до підготовки ефективних професіоналів, здатних адаптуватися до різноманітних соціальних викликів та сприяти гармонізації суспільних процесів. Окреслено особистість соціального працівника та визначено основні складові соціально-комунікативних навичок: вміння вислухати та зрозуміти проблему клієнта; обізнаність, освіченість, емпатія, емоційна інтелігентність; вміння пояснювати складні речі просто; навички вирішення суперечок; культурна компетентність і толерантність; рефлексивність і здатність до самокритики. Також запропоновано шляхи формування соціально-комунікативних навичок соціального працівника: структуроване навчання та виховання, самонавчання та саморозвиток, практична діяльність. Зазначено, що високий рівень професійної компетентності соціального працівника підтримується навчанням, вихованням, самонавчанням та самовдосконаленням. Особлива увага відводиться курсовій підготовці соціального працівника шляхом участі у спеціалізованих освітніх заходах (програмах підвищення кваліфікації, онлайн-тренінгах, курсах з міжкультурної комунікації та етики).У висновках зазначається необхідність інтеграції філософсько-освітніх постулатів з практичними освітніми методиками створення органічного середовища для стимуляції розвитку особистості з опорою на цінності та етичні аспекти людської життєдіяльності. Також підкреслено, що філософсько-освітній підхід до формування соціально-комунікативних навичок відкриває перед соціальним працівником широкі можливості для особистісного та професійного зростання, оскільки допомагає оволодіти методами ефективного спілкування, розвивати внутрішню чутливість, емпатію та критичне мислення, що є запорукою якісної соціальної роботи.

Ключові слова: *філософія освіти, особистість, соціальний працівник, соціально-комунікативні навички, структуроване навчання, курсова підготовка, практична діяльність.*

H. D. BEREHOVA
Doctor of Philosophical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Economics, Entrepreneurship
and Economic Security
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-2418-7178

THE WORLDVIEW-FORMING POTENTIAL OF PHILOSOPHICAL KNOWLEDGE IN THE PROFESSIONAL TRAINING SYSTEM OF FUTURE SPECIALISTS IN THE FIELD OF SOCIAL WORK

The article discusses the importance of integrating philosophical ideas with purposeful educational practice for the effective training of social workers who are able to adapt to various social challenges and contribute to the harmonization of social processes. It also outlines the personality of a social worker and the ways of forming his social and communicative skills, including structured training, self-study and practical experience. The personality of a social worker is outlined and his main components of social and communicative skills are identified: the ability to listen and understand the client's problem; awareness, education, empathy, emotional intelligence; the ability to simply explain complex things; dispute resolution skills; cultural competence and tolerance; reflexivity and the ability to self-criticism. It also suggests ways of forming the social and communicative skills of a social worker: structured training and education, self-study and self-development, practical activity. The text emphasizes the importance of continuous learning and self-improvement to maintain a high level of professional competence. Furthermore, the article emphasizes the value of specialized educational activities, such as curricula and courses on intercultural communication and ethics, in the training of social workers. The conclusion indicates the need for a holistic approach that combines philosophical and educational principles with practical methods to create an environment that promotes personal development

based on values and ethical considerations. It is also emphasized that the philosophical and educational approach to the formation of social and communicative skills opens up wide opportunities for personal and professional growth for the social worker, as it helps to master the methods of effective communication, develop inner sensitivity, empathy and critical thinking, which is the key to high-quality social work.

Key words: *philosophy of education, personality, social worker, social and communicative skills, structured learning, course preparation, practical activity.*

Постановка проблеми

Соціально-комунікативні навички є запорукою ефективного спілкування, встановлення довірчих відносин та вирішення конфліктних ситуацій у професійній діяльності соціального працівника.

Сучасна соціальна дійсність вимагає від фахівця не лише практичних умінь, а й глибокого розуміння моральних, етичних і філософських засад людського буття. Саме тут філософсько-освітній підхід стає невід'ємною складовою підготовки, спрямованою на всебічний розвиток особистості та міжособистісного спілкування.

Формулювання мети дослідження

Метою цієї роботи є окреслення методологічної функції філософії освіти у формуванні особистості соціального працівника; визначення основних соціально-комунікативних навичок соціального працівника; акцентуація ціннісних і етичних аспектів у роботі та соціальних дослідженнях соціального працівника.

Викладення основного матеріалу дослідження

Формування особистості майбутнього фахівця в галузі соціальної роботи, майбутня професійна діяльність якого буде пов'язана з нагальними проблемами суспільства, особливого значення набуває світоглядно-формуючий потенціал філософських знань, «філософія формує науковий світогляд, ціннісні орієнтації та життєві позиції майбутнього професіонала, а отже, є основою гуманізації всієї системи сучасної вищої освіти» [4, с. 344].

Методологічна функція філософії освіти у формуванні особистості

Сучасна філософія освіти виконує методологічну функцію у формуванні особистості фахівця. Філософія освіти є розділом соціальної філософії, який досліджує природу освіти, її цілі та проблеми. Також тут розглядаються концепції та передумови теорій освіти. Це міждисциплінарна сфера, яка черпає натхнення з різних дисциплін як у філософії, так і за її межами, як-от етика, політична філософія, психологія та соціологія.

Відправною точкою сучасних філософських досліджень освіти є ідентифікація освітніх практик і цілей, які ними керують. Освіта може бути широко охарактеризована як сприяння кращим формам навчання та особистісного розвитку за допомогою освітніх практик.

Філософія освіти, зазначає Р.Каррен, порушує п'ять основних запитань: Які цілі освіти? Яким має бути зміст освіти? Як має здійснюватися освітній процес? Як визначаються освітні повноваження? Які обов'язки передбачає навчання? «Відповіді на ці нормативні питання про освіту зазвичай починаються з уявлень про природу освіти, але вони часто ґрунтуються на філософських, емпіричних і гібридних твердженнях про людський розвиток, раціональність, добробут, свободу, мотивацію, чесноти, знання, розуміння, мову, спілкування, співпрацю, вимірювання, досвід, демократію, справедливе суспільство, роботу та ін.» [1].

Р. Каррен разом із міжнародною командою видатних філософів у «Довіднику з філософії освіти» порушує найважливіші питання освіти. Серед фундаментальних питань розглядаються цілі освіти, освітні повноваження, роль цінностей і переконань у виборі освіти, а також фундаментальні питання про людське пізнання, навчання, благополуччя та ідентичність [3].

Особлива увага приділяється формуванню особистісних якостей, які вважаються необхідними для успішної життєдіяльності людей і суспільств: виховання інтелектуальних чеснот і чеснот характеру, природа та формування досвіду, чесноти стоїків та інтелектуальні вади людини.

Також у підручнику розглядаються фундаментальні та сучасні питання освітньої справедливості, від рівних можливостей для отримання освіти, расового домінування та мовної справедливості в освіті до освітніх проблем масової міграції, глобальної освітньої справедливості, освіти працюючих дітей у всьому світі, вартості вищої освіти та висхідної мобільності. Освітня практика окреслює суперечливі аспекти сучасної освіти: суперечки навколо свободи слова та навчання спірним питанням; антирасизм, стійкість і статеве виховання тощо [3].

Особистість соціального працівника

Соціальна робота значною мірою залежить від здатності підтримувати глибокий зв'язок з окремими людьми та громадами. На практиці соціальні працівники застосовують ці соціально-комунікативні навички для зміцнення довіри, сприяння розумінню та створення середовища, сприятливого для зцілення та розширення можливостей.

Соціальні працівники у спілкування з клієнтами повинні дотримуватися своєрідного морального кодексу: чесність і прозорість; уникнення шкоди етичні проблеми та виклики тощо.

Для успішного формування особистості соціального працівника необхідні певні педагогічні умови. До таких умов І. Іонова відносить «спеціально створені обставини, за яких відбувається стимулювання прагнення майбутніх соціальних працівників до самореалізації, професійного зростання і розвитку в галузі соціальної роботи».

Дослідниця також визначає педагогічні основні умови професійної спрямованості майбутніх соціальних працівників, серед яких передусім спрямування мотиваційної сфери майбутніх соціальних працівників на здобуття професії соціального працівника, формування ціннісного ставлення до професії соціального працівника та оволодіння майбутніми соціальними працівниками професійними знаннями і вміннями [9, с. 160].

Навчанню соціальних працівників присвячено досить велику кількість наукових робіт, у яких йдеться про формування особистості соціального працівника та його майбутню діяльність, особистісні якості: відповідальність, комунікативність, емпатія, деонтологічна культура, духовність [7, 10, 12–19].

Так, Д. Бибик обґрунтовує модель формування соціального лідерства у майбутніх соціальних працівників, яка складається з цільового, організаційного, змістовно-методичного, результативного блоків. Також дослідниця визначає організаційно-педагогічні умови формування соціального лідерства у майбутніх соціальних працівників в умовах професійної підготовки: створення школи соціального лідерства, розроблення вибіркових навчальних дисциплін тощо [5, с. 483].

Однією з ключових складових сучасного підходу до підготовки соціальних працівників є *менторство*, оскільки допомагає об'єднати теоретичні знання з практичним досвідом та сприяє розвитку як професійних, так і особистісних компетенцій.

Слід додати, що багато робіт з філософії освіти зосереджуються прямо чи дотично на освітньому процесі, зокрема на формуванні світогляду особистості. Так, Г. Васянович, Р. Лаврецький і М. Нагірняк акцентують свою увагу на формуванні такої індивідуальної якості як національний патріотизм, головним чинником якого є духовність, а також обґрунтовують систему методів виховного впливу на здобувачів вищої освіти соціального профілю [6, с. 43]. А. Заблоцький розглядає підготовку майбутніх працівників соціальної сфери до роботи в різних формах сімейного виховання, виокремлюючи специфічні принципи цієї підготовки – людиноцентризму, раціонального використання ресурсів, виважених рішень, індивідуальної та соціальної значущості [8, с. 220].

З огляду на ці наукові роботи й багато інших, слід зазначити, що в найширшому розумінні освіта включає й виховання особистості, що відбувається також і в різних інших сферах, наприклад, вдома, у бібліотеках, музеях або в громадських засобах масової інформації.

Вдосконалення навичок соціальної роботи протягом усього життя передбачає *самонавчання* соціального працівника, адже це безперервна подорож, яка включає як структуроване навчання, так і практику в реальному світі. Так, Лякішева А. розкриває сутність самоосвіти та її значення у розвитку соціальних навичок у майбутніх соціальних працівників, зокрема йдеться про «soft skills» як універсальні, надпрофесійні навички (загальні компетентності), які забезпечують адаптацію в соціумі та успішне кар'єрне зростання [11, с. 26].

Отже, особистість соціального працівника формується шляхом навчання, виховання та самонавчання.

Формування особистості соціального працівника передбачає формування у нього певного набору соціально-комунікативних навичок.

Соціально-комунікативні навички соціального працівника

Соціально-комунікативні навички соціального працівника є комплексом умінь та особистісних характеристик, що дозволяють фахівцю ефективно взаємодіяти з різними групами населення, встановлювати довірливі стосунки та успішно вирішувати конфліктні ситуації. Ці навички є основою для створення комфортного середовища, де кожен клієнт відчуває підтримку та розуміння.

До основних складових соціально-комунікативних навичок слід віднести такі, як-ом: вміння вислухати та зрозуміти проблему клієнта (активне слухання та сприйняття); людяність (обізнаність, освіченість, емпатія, емоційна інтелігентність; вміння пояснювати складні речі просто (ясність і чіткість у спілкуванні); навички вирішення суперечок (знання з конфліктології); культурна компетентність і толерантність; рефлексивність і здатність до самокритики.

Соціальний працівник повинен не лише чути слова співрозмовника, а й уважно спостерігати за невербальними сигналами, такими як міміка, жестикулювання та тон голосу – це дозволяє глибше зрозуміти емоційний стан клієнта та визначити основні проблеми, з якими він стикається.

Емпатія є здатністю співпереживати емоціям іншої людини, і вона стає вирішальною для встановлення довірливих стосунків. Емоційна інтелігентність допомагає соціальному працівнику розпізнавати власні почуття, а також розуміти емоції клієнта, що дозволяє коригувати свою поведінку та ефективно реагувати на стресові ситуації.

Уміння пояснювати складні речі простою мовою є необхідним для успішного контакту з клієнтами з різним рівнем освіти та досвіду. Лаконічність, логічність викладу та застосування конкретних прикладів сприяють кращому сприйняттю інформації і знижують ризик непорозумінь.

В умовах роботи з людьми часто виникають напружені ситуації або конфлікти. Соціальний працівник повинен вміти конструктивно розглянути проблему, забезпечуючи відкритий діалог між сторонами та знаходячи компромісні рішення, розуміючи, що поява суперечок може бути природною частиною міжособистісного спілкування.

У роботі соціального працівника важливо враховувати культурний контекст життя клієнта. Поважаючи різноманітність традицій, мов і світоглядів, фахівець може створити атмосферу поваги та взаєморозуміння, що стимулює відкритість і бажання співпрацювати.

Постійний аналіз власної діяльності, усвідомлення сильних і слабких сторін у власних комунікативних підходах дозволяє соціальному працівнику постійно вдосконалювати свої вміння. Саморефлексія сприяє розвитку критичного мислення і допомагає адаптувати методи роботи до нових соціальних викликів.

Як бачимо, безперечним є значення соціально-комунікативних навичок у практиці соціальної роботи, адже розвинені соціально-комунікативні навички дозволяють соціальному працівникові ефективно: налагоджувати відкритий діалог (створювати середовище, де клієнт відчуває себе почутим і зрозумілим, що сприяє більш глибокому розумінню його потреб); вирішувати конфлікти (вчасно розпізнавати й залагоджувати суперечливі ситуації завдяки конструктивній комунікації і пошуку компромісів); працювати в мультикультурному середовищі (забезпечувати індивідуальний підхід до кожного клієнта з урахуванням його культурного контексту, що сприяє зменшенню соціальної нерівності); підтримувати емоційну стабільність (ефективно реагувати на емоційні потрясіння клієнтів, сприяючи відновленню психологічного комфорту та довіри).

На практиці соціально-комунікативні вміння є не тільки професійною вимогою, а й ключем до успішного вирішення соціальних проблем. Вони формуються через спеціалізоване навчання, практичний досвід, стажування та наставництво, що дозволяє соціальному працівнику глибше зрозуміти соціокультурний контекст, адаптуватися до змін і ефективно реагувати на різноманітні потреби клієнтів.

Соціально-комунікативні навички є комплексом компетенцій, що включає активне слухання, емпатію, чіткість викладу, здатність вирішувати конфлікти та культурну чутливість. Вони є основою для створення довірливих відносин і забезпечення ефективного обміну інформацією у роботі соціального працівника. Розвиток цих навичок сприяє як професійному зростанню, так і особистісному вдосконаленню фахівця, що в кінцевому результаті покращує якість надання соціальних послуг.

Курси для набуття та розвитку соціально-комунікативних навичок соціального працівника можна умовно розділити на кілька груп – від спеціалізованих програм підвищення кваліфікації до онлайн-тренінгів, що орієнтовані на розвиток «soft skills». Розглянемо основні категорії:

1. Підвищення кваліфікації соціальних працівників. Такі програми зазвичай охоплюють теоретичні аспекти соціальної роботи, етику, психологію, а також розвиток навичок активного слухання, поведінкових моделей вирішення конфліктів і побудови міжособистісного спілкування. Ці курси допомагають не тільки розширити професійні знання, а й сформувати емоційну чутливість та здатність емпатійно реагувати на потреби клієнтів.

2. Курси з комунікацій і розвитку «soft skills». Це програми з активного слухання, невербальної комунікації, емоційного інтелекту та кризисного втручання. Такі курси допомагають розвивати здатність чітко висловлювати думки, вести конструктивні діалоги та ефективно вирішувати конфлікти. Багато з цих курсів доступні як у безкоштовному, так і в платному форматі, що дозволяє вибрати варіант залежно від фінансових можливостей та попереднього досвіду.

3. Інтеркультурна комунікація та етика. Оскільки діяльність соціального працівника часто супроводжується взаємодією з представниками різних культур та соціальних груп, курси з міжкультурної комунікації є не менш важливими. Вони дають розуміння соціальних норм, специфіки культурних особливостей та етичних стандартів, що сприяє створенню довірчих стосунків із клієнтами незалежно від їхнього походження.

4. Психологія і рефлексивні практики. Для поглибленого розуміння емоційної сфери важливо опановувати базові знання психології. Курси, що присвячені основам психології, емоційній грамотності та методам самоаналізу, допомагають соціальним працівникам розвивати критичне мислення та рефлексивність, що є ключовими для ефективної роботи у стресових ситуаціях.

На практиці курсова підготовка часто комбінує теоретичні блоки з інтерактивними тренінгами, симуляціями та аналізом кейсів, що дає можливість застосувати набуті знання у реальних або змодельованих ситуаціях. Варто звертати увагу на пропозиції як від державних установ, так і від приватних онлайн-платформ – це дозволить підібрати програму, яка найкраще відповідає професійним потребам та етапу розвитку конкретного спеціаліста.

Таким чином, інтегроване навчання через різноманітні курси дозволяє соціальному працівнику не лише вдосконалити свої комунікативні навички, а й розвинути етичну свідомість, емоційну грамотність та здатність до інтеграції культурних особливостей у щоденну практику.

Цінності та етичні аспекти у роботі соціального працівника

Розуміння етичних принципів та їх впливу на дослідження допомагає соціальним працівникам проводити наукові роботи з максимальною чесністю та відповідальністю.

Соціальні дослідники стикаються з різними етичними викликами, такими, як: забезпечення добровільної участі й інформованої згоди; захист конфіденційності та приватності учасників; відповідальність за подання точних і достовірних даних, уникнення маніпуляцій та неправомірного впливу на учасників.

Ось кілька прикладів етичних дилем, які можуть виникнути у процесі роботи соціального працівника: розгляд чутливих тем, таких як насильство або дискримінація, може призвести психологічні травми учасників; конфлікти інтересів, коли соціальний працівник може мати особисту вигоду від певних результатів; виявлення незаконних дій чи діяльності соціального працівника.

Слід також тут навести і набір сучасних стратегій для самонавчання та самовдосконалення особистості соціального працівника (табл. 1).

Таблиця 1

Стратегії вдосконалення соціально-комунікативних якостей особистості соціального працівника

Стратегія	Дії	Очікуваний результат
Самооцінка	Поміркуйте, визначте свої сильні/слабкі сторони, занотуйте їх	Чітке розуміння галузей для покращення
Зворотній зв'язок	Отримайте інформацію від колег, керівників і клієнтів	Індивідуальні стратегії особистісного та професійного зростання
Професійний розвиток	Запишіться на курси, майстер-класи та семінари	Поглиблені теоретичні знання та практичні навички
Симуляція та рольова гра	Участь в інтерактивних стажуваннях та тематичних дослідженнях	Покращена готовність до реальних умов і управління кризовими ситуаціями
Культурна компетентність	Відвідайте тренінги з культурної чутливості та беріть участь у громадській роботі	Краща взаємодія з різними групами клієнтів
Наставництво	Зв'яжіться з досвідченими соціальними працівниками та приєднайтеся до супервізії	Глибоке керівництво, підтримка та розуміння
Будьте в курсі	Читайте актуальну літературу та приєднуйтеся до професійних мереж	Інформовані практики та постійні інновації

Інтегруючи вище зазначені стратегії самовдосконалення, соціальні працівники можуть створити комплексний підхід до вдосконалення ваших навичок соціальної роботи. Безперервне навчання, практичне застосування та безперервні роздуми є ключовими для оволодіння такою ж динамічною та складною сферою, як соціальна робота.

Цінності та етика відіграють центральну роль також й у соціальних дослідженнях. Вони забезпечують те, що дослідження проводяться чесно, прозоро та з повагою до прав усіх учасників. Етика допомагає уникати шкоди для учасників та суспільства, а також забезпечує достовірність та надійність результатів.

У забезпеченні відповідності досліджень етичним нормам відіграють важливу роль етичні комітети, котрі перевіряють дослідницькі проекти, надають рекомендації та контролюють дотримання етичних стандартів. Крім того, багато наукових установ мають внутрішні керівництва з етики, які допомагають дослідникам уникати етичних порушень.

Як бачимо, цінності та етичні аспекти є невід'ємною частиною соціального дослідження, адже вони забезпечують чесність, прозорість і повагу до прав усіх учасників. Дотримання етичних принципів дозволяє соціальним працівникам проводити дослідження соціальної реальності з максимальною відповідальністю та достовірністю.

Висновки

Вище викладене дозволяє зробити деякі висновки.

1. Філософсько-освітній підхід до формування соціально-комунікативних навичок відкриває перед соціальним працівником широкі можливості для особистісного та професійного зростання. Такий підхід допомагає не лише оволодіти методами ефективного спілкування, а й розвивати внутрішню чутливість, емпатію та критичне мислення, що є запорукою якісної соціальної роботи. Інтеграція філософських ідей із цільовими освітніми практиками стає ключем до підготовки ефективних професіоналів, здатних адаптуватися до різноманітних соціальних викликів та сприяти гармонізації суспільних процесів.

2. Особистість соціального працівника формується протягом усього шляхом навчання, виховання та самонавчання. Формування особистості соціального працівника передусім передбачає формування у нього певного набору соціально-комунікативних навичок у вищому навчальному закладі, де однією з ключових складових сучасного підходу до підготовки соціальних працівників є менторство (допомагає об'єднати теоретичні знання з практичним досвідом та сприяє розвитку як професійних, так і особистісних компетенцій). У широкому розумінні освіта соціального працівника включає і виховання особистості, що залежить від здатності підтримувати глибокий зв'язок з окремими людьми та громадами та діяти відповідно до морального кодексу (чесність, прозорість, уникнення шкоди тощо). Вдосконалення навичок соціальної роботи передбачає самонавчання соціального працівника (структуроване навчання, практична діяльність).

3. Безперечним є значення соціально-комунікативних навичок у практиці соціальної роботи, адже розвинені соціально-комунікативні навички дозволяють соціальному працівникові ефективно: налагоджувати відкритий діалог (створювати середовище, де клієнт відчуває себе почутим і зрозумілим, що сприяє більш глибокому розумінню його потреб); вирішувати конфлікти (вчасно розпізнавати й залагоджувати суперечливі ситуації завдяки конструктивній комунікації і пошуку компромісів); працювати в мультикультурному середовищі (забезпечувати індивідуальний підхід до кожного клієнта з урахуванням його культурного контексту, що сприяє зменшенню

соціальної нерівності); підтримувати емоційну стабільність (ефективно реагувати на емоційні потрясіння клієнтів, сприяючи відновленню психологічного комфорту та довіри).

4. Високий рівень професійної компетентності соціального працівника підтримується навчанням, вихованням, самонавчанням та самовдосконаленням. Інтегроване навчання через різноманітні курси дозволяє соціальному працівнику розвинути етичну свідомість, емоційну грамотність та здатність до інтеграції культурних особливостей у щоденну практику. Курсова підготовка та перепідготовка соціального працівника охоплює програми підвищення кваліфікації, онлайн-тренінги, курси з міжкультурної комунікації та етики тощо.

5. Сучасна освіта соціальних працівників має рухатися у напрямку інтеграції філософських постулатів з практичними освітніми методиками, створюючи середовище, яке стимулює розвиток особистості в усіх її вимірах, де цінності та етичні аспекти є невід'ємною частиною соціального життя та забезпечують чесність, прозорість і повагу до людей.

Список використаної літератури

1. Curren, Randall. (2025). Philosophy of Education. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2025 Edition), Edward N. Zalta & Uri Nodelman (eds.), URL = https://plato.stanford.edu/archives/spr2025/entries/education-philosophy/

2. Curren, Randall. (2023). Aristotle on Civic Education, Friendship, and Democracy. in Julian Culp, Johannes Drerup, and Douglas Yacek, eds., *Cambridge Handbook of Democratic Education*. Cambridge: Cambridge University Press.

3. Curren, Randall. (2022). Handbook of Philosophy of Education. New York : Routledge.

4. Берегова, Г., & Костючков, С. (2024). Світоглядно-формуючий потенціал філософських знань у системі професійної підготовки майбутніх фахівців у галузі соціальної роботи. *Psychology Travelogs*, (4), 344–354. DOI: https://doi.org/10.31891/PT-2024-4-33

5. Бибик Д. (2020). Модель формування соціального лідерства у майбутніх соціальних працівників в умовах професійної підготовки. *Social work and education*. 7 (4). С. 483–496. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/socworkeduc_2020_7_4_8

6. Васянович, Г. П., Лаврецький, Р. В., Нагірняк, М. Я. (2024). Духовність як головний чинник національно-патріотичного виховання особистості майбутнього соціального працівника. *Публічне управління та соціальна робота*, 1, 43–51. DOI: https://doi.org/10.32782/3041-1319/2024-1-7

7. Дітковська, Л. А. (2021). Формування цифрової компетентності майбутніх соціальних працівників. *Наукові записки. Серія: Педагогічні науки*, 199, 109–114.

8. Заблоцький, А. Р. (2023). Підготовка майбутніх працівників соціальної сфери до роботи в різних формах сімейного виховання. *Науковий вісник Кременецької обласної гуманітарно-педагогічної академії імені Тараса Шевченка. Серія: Педагогічні науки*, (17), 220–227. DOI: https://doi.org/10.32782/2410-2075-2023-17.27

9. Іонова, І. (2019). Педагогічні умови формування професійної спрямованості майбутніх соціальних працівників. *Інноваційна педагогіка*. Вип. 11(1). С. 160–163. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/innped_2019_11(1)__36

10. Кочубей, Т., & Ткачук, Ю. (2021). Соціальні навички soft skills у системі компетентностей майбутніх соціальних працівників. *Соціальна робота та соціальна освіта*, 2 (7), 42–51.

11. Лякішева А. Роль самоосвіти у розвитку соціальних навичок майбутніх соціальних працівників. *Соціальна робота та соціальна освіта*. 2024. Вип. 1 (12). С. 26–34. DOI: https://doi.org/10.31499/2618-0715.1(12).2024.305066

12. Петрова, Т. В. (2024). Превентивна діяльність соціального працівника щодо впливу інтернет-ресурсів на формування агресивності підлітків http://hdl.handle.net/123456789/2007

13 Поліщук, В. (2022). Формування соціальної відповідальності у майбутніх фахівців соціальної роботи: системний підхід. *Соціальна робота та соціальна освіта*, 2(9), 281–288.

14. Сай, Д. В. (2023). Формування деонтологічної культури майбутніх соціальних працівників у закладах вищої освіти. ЧНУ ім. Петра Могили. Миколаїв, 2023. 150 с.

15. Сайко, Н., & Бацман, О. (2023). Модель підготовки майбутніх соціальних працівників до соціально-реабілітаційного процесу. *Духовність особистості: методологія, теорія і практика*. 1, 2(106).

16. Сургова, С. Ю. (2021). Підготовка майбутніх соціальних працівників до превентивної діяльності: монографія. Миколаїв : Іліон, 2021. 252 с.

17. Червоненко, К. С. (2022). Формування професійної мобільності майбутніх соціальних працівників у процесі волонтерської діяльності. *Педагогічні науки: реалії та перспективи*. Випуск 85. Серія 5. С. 217–222. https://doi.org/10.31392/NPU-nc.series5.2022.85.46

18. Шевченко, К. Р. (2024). Формування професійної компетентності соціального працівника в системі неформальної освіти. Запоріжжя: ЗНУ, 2024. 61 с.

19. Юрків, Я. І. (2021). Теорія і практика професійної підготовки майбутніх соціальних педагогів та соціальних працівників до роботи із вразливими категоріями населення: автореф. дис.... д-ра пед. наук: 13.00.05; ЛНУ ім. Тараса Шевченка. Старобільськ, 2021. 44 с.

References

1. Curren, Randall. (2025). Philosophy of Education. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2025 Edition), Edward N. Zalta & Uri Nodelman (eds.), URL = https://plato.stanford.edu/archives/spr2025/entries/education-philosophy/
2. Curren, Randall. (2023). Aristotle on Civic Education, Friendship, and Democracy. in Julian Culp, Johannes Drerup, and Douglas Yacek, eds., *Cambridge Handbook of Democratic Education*. Cambridge: Cambridge University Press.
3. Curren, Randall. (2022). Handbook of Philosophy of Education. New York : Routledge.
4. Berehova, H., & Kostiuchkov, S. (2024). Svitohliadno-formuiuchyi potentsial filosofskykh znan u systemi profesiinoi pidhotovky maibutnikh fakhivtsiv u haluzi sotsialnoi roboty [The worldview-forming potential of philosophical knowledge in the system of professional training of future specialists in the field of social work]. *Psychology Travelogs*, (4), 344–354. DOI: https://doi.org/10.31891/PT-2024-4-33 [in Ukrainian].
5. Bybyk D. (2020). Model formuvannia sotsialnoho liderstva u maibutnikh sotsialnykh pratsivnykiv v umovakh profesiinoi pidhotovky [Model of social leadership formation in future social workers in professional training conditions]. Social work and education. 7(4). S. 483–496. Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/socworkeduc_2020_7_4_8 [in Ukrainian].
6. Vasianovych, H. P., Lavretskyi, R. V., Nahirniak, M. Ya. (2024). Dukhovnist yak holovnyi chynnyk natsionalno-patriotychnoho vykhovannia osobystosti maibutnoho sotsialnoho pratsivnyka [Spirituality as the main factor in the national-patriotic education of the personality of a future social worker]. Publichne upravlinnia ta sotsialna robota, 1, 43–51. DOI: https://doi.org/10.32782/3041-1319/2024-1-7 [in Ukrainian].
7. Ditkovska, L. A. (2021). Formuvannia tsyfrovoi kompetentnosti maibutnikh sotsialnykh pratsivnykiv [Formation of digital competence of future social workers]. Naukovi zapysky. Seriia: Pedahohichni nauky, 199, 109–114 [in Ukrainian].
8. Zablotskyi, A. R. (2023). Pidhotovka maibutnikh pratsivnykiv sotsialnoi sfery do roboty v riznykh formakh simeinoho vykhovannia [Preparing future social workers for work in various forms of family upbringing]. Naukovyi visnyk Kremenetskoi oblasnoi humanitarno-pedahohichnoi akademii imeni Tarasa Shevchenka. Seriia: Pedahohichni nauky, (17), 220–227. DOI: https://doi.org/10.32782/2410-2075-2023-17.27 [in Ukrainian].
9. Ionova, I. (2019). Pedahohichni umovy formuvannia profesiinoi spriamovanosti maibutnikh sotsialnykh pratsivnykiv [Pedagogical conditions for the formation of professional orientation of future social workers]. Innovatsiina pedahohika. Vyp. 11(1). S. 160-163. Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/innped_2019_11(1)__36 [in Ukrainian].
10. Kochubei, T., & Tkachuk, Yu. (2021). Sotsialni navychky soft skills u systemi kompetentnostei maibutnikh sotsialnykh pratsivnykiv [Social soft skills in the system of competencies of future social workers]. Sotsialna robota ta sotsialna osvita, 2 (7), 42–51 [in Ukrainian].
11. Liakisheva A. Rol samoosvity u rozvytku sotsialnykh navychok maibutnikh sotsialnykh pratsivnykiv [The role of self-education in the development of social skills of future social workers]. Sotsialna robota ta sotsialna osvita. 2024. Vyp. 1 (12). S. 26–34. DOI: https://doi.org/10.31499/2618-0715.1(12).2024.305066 [in Ukrainian].
12. Petrova, T. V. (2024). Preventyvna diialnist sotsialnoho pratsivnyka shchodo vplyvu internet-resursiv na formuvannia ahresyvnosti pidlitkiv [Preventive activities of a social worker regarding the influence of Internet resources on the formation of aggressiveness of adolescents]. http://hdl.handle.net/123456789/2007 [in Ukrainian].
13. Polishchuk, V. (2022). Formuvannia sotsialnoi vidpovidalnosti u maibutnikh fakhivtsiv sotsialnoi roboty: systemnyi pidkhid [Formation of social responsibility in future social work specialists: a systemic approach]. Sotsialna robota ta sotsialna osvita, 2(9), 281–288 [in Ukrainian].
14. Sai, D. V. (2023). Formuvannia deontolohichnoi kultury maibutnikh sotsialnykh pratsivnykiv u zakladakh vyshchoi osvity Formation of deontological culture of future social workers in higher education institutions]. ChNU im. Petra Mohyly. Mykolaiv, 2023. 150 s. [in Ukrainian].
15. Saiko, N., & Batsman, O. (2023). Model pidhotovky maibutnikh sotsialnykh pratsivnykiv do sotsialno-reabilitatsiinoho protsesu [Model of training future social workers for the social rehabilitation process]. Dukhovnist osobystosti: metodolohiia, teoriia i praktyka. 1, 2 (106) [in Ukrainian].
16. Surhova, S. Yu. (2021). Pidhotovka maibutnikh sotsialnykh pratsivnykiv do preventyvnoi diialnosti [Preparation of future social workers for preventive activities]: monohrafiia. Mykolaiv: Ilion, 2021. 252 s. [in Ukrainian].
17. Chervonenko, K. S. (2022). Formuvannia profesiinoi mobilnosti maibutnikh sotsialnykh pratsivnykiv u protsesi volonterskoi diialnosti [Formation of professional mobility of future social workers in the process of volunteering]. Pedahohichni nauky: realii ta perspektyvy. Vypusk 85. Seriia 5. S. 217-222. https://doi.org/10.31392/NPU-nc.series5.2022.85.46 [in Ukrainian].
18. Shevchenko, K. R. (2024). Formuvannia profesiinoi kompetentnosti sotsialnoho pratsivnyka v systemi neformalnoi osvity [Formation of professional competence of a social worker in the system of informal education]. Zaporizhzhia: ZNU, 2024. 61 s. [in Ukrainian].
19. Yurkiv, Ya. I. (2021). Teoriia i praktyka profesiinoi pidhotovky maibutnikh sotsialnykh pedahohiv ta sotsialnykh pratsivnykiv do roboty iz vrazlyvymy katehoriiamy naselennia [Theory and practice of professional training of future social educators and social workers for work with vulnerable categories of the population]: avtoref. dys. ... d-ra ped. nauk: 13.00.05; LNU im. Tarasa Shevchenka. Starobilsk, 2021. 44 s. [in Ukrainian].

УДК 338:005.93:330.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.50

Н. М. ОЛІЙНИК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри економіки, підприємництва та економічної безпеки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-1019-5708

О. С. СМОЛЯК
аспірант кафедри економіки, підприємництва та економічної безпеки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0004-6339-1560

Д. М. ІЛЬЯШЕНКО
аспірант кафедри економіки, підприємництва та економічної безпеки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0001-6077-867X

СТРАТЕГІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОСТІ У КОНТЕКСТІ СТИМУЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ПІДПРИЄМНИЦТВА

У даній роботі розглянуто концептуальні засади забезпечення і підвищення рівня економічної безпеки у контексті стимулювання розвитку підприємництва. В умовах глобальної нестабільності економічна безпека є фундаментом для стабільного функціонування та надзвичайно важливою складовою для стимулювання розвитку підприємництва. Значна кількість внутрішніх та зовнішніх загроз і небезпек, які впливають на ефективність ведення бізнесу в умовах ризику та нестабільності, вимагають системного та комплексного підходу до оцінювання, забезпечення й підвищення рівня економічної безпеки підприємництва. Відповідно до зазначеного метою даного дослідження є обґрунтування типів стратегій забезпечення і підвищення рівня економічної безпеки в умовах нестабільності у контексті стимулювання розвитку підприємництва.

На основі узагальнення вітчизняних та закордонних напрямів теоретичних досліджень сутності економічної безпеки встановлено, що дана дефініція є багатокомпонентною системою, яка складається з численних показників із різною базою вимірювання. Сукупність показників, які впивають на рівень економічної безпеки підприємництва, системно характеризує рівень фінансової стабільності суб'єкта господарювання, ефективність управління ресурсами та бізнес-процесами, рентабельність, економічну стійкість до зовнішніх і внутрішніх загроз, а також спроможність суб'єкта підприємницької діяльності нейтралізувати ризики, пов'язані з динамічними змінами та невизначеністю в умовах нестабільності.

Систематизовано результати опитування щодо становища українського бізнесу в умовах війни після повномасштабного вторгнення рф на територію України. Встановлено, що навіть під час війни український бізнес поступово адаптується до нових реалій. Вітчизняні підприємці в умовах воєнного стану трансформуються, модернізуються, шукають нові можливості. В Україні малий та середній бізнес повертається до роботи, проте відновлюється повільніше, ніж великий бізнес.

За результатами проведеного теоретико-методичного дослідження запропоновано виокремлювати сім стратегій забезпечення економічної безпеки підприємництва в залежності від п'яти можливих рівнів економічної безпеки. Результати дослідження можуть бути використані українськими підприємцями під час процесу формування та вибору стратегії забезпечення і підвищення рівня економічної безпеки.

Ключові слова: *економічна безпека, підприємництво, нестабільність, ризики, загрози, небезпеки, стратегія, стимулювання розвитку.*

N. M. OLIINYK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Economics,
Entrepreneurship and Economic Security
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-1019-5708

O. S. SMOLYAK
Postgraduate Student at the Department of Economics,
Entrepreneurship and Economic Security
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0004-6339-1560

D. M. ILYASHENKO
Postgraduate Student at the Department of Economics,
Entrepreneurship and Economic Security
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0001-6077-867X

STRATEGIES FOR ENSURING ECONOMIC SECURITY IN THE CONTEXT OF INSTABILITY IN THE CONTEXT OF STIMULATING ENTREPRENEURSHIP DEVELOPMENT

This paper examines the conceptual framework for ensuring and improving the level of economic security in the context of stimulating entrepreneurship. In the context of global instability, economic security is the foundation for stable functioning and an extremely important component for stimulating entrepreneurship. A significant number of internal and external threats and dangers that affect the efficiency of doing business in conditions of risk and instability require a systematic and comprehensive approach to assessing, ensuring and improving the level of economic security of entrepreneurship. In accordance with the above, the purpose of this study is to substantiate the types of strategies for ensuring and improving the level of economic security in conditions of instability in the context of stimulating entrepreneurship development.

On the basis of generalization of domestic and foreign directions of theoretical research on the essence of economic security, it is established that this definition is a multicomponent system consisting of numerous indicators with different measurement bases. The set of indicators that affect the level of economic security of entrepreneurship systematically characterizes the level of financial stability of a business entity, the efficiency of resource management and business processes, profitability, economic resilience to external and internal threats, as well as the ability of a business entity to neutralize the risks associated with dynamic changes and uncertainty in an unstable environment.

The results of the survey on the situation of Ukrainian business in the conditions of war after the full-scale invasion of the russian federation into the territory of Ukraine are systematized. It has been established that even during the war, Ukrainian business is gradually adapting to new realities. Domestic entrepreneurs are transforming, modernizing, and looking for new opportunities under martial law. In Ukraine, small and medium-sized businesses are returning to work, but recovering more slowly than large businesses.

Based on the results of the carried out theoretical and methodological research, it is proposed to distinguish seven strategies for ensuring economic security of entrepreneurship, depending on five possible levels of economic security. The results of the study can be used by Ukrainian entrepreneurs in the process of forming and choosing a strategy for ensuring and improving the level of economic security.

Key words: *economic security, entrepreneurship, instability, risks, threats, dangers, strategy, development stimulation.*

Постановка проблеми

В умовах глобальної нестійкості економічна безпека підприємництва є надзвичайно важливою складовою забезпечення стабільного функціонування й розвитку країни загалом. Підприємництво в умовах нестабільності являється важливим джерелом надходження податків та зборів, фактором зростання зайнятості населення і формування середнього класу як гаранту політичної стабільності й соціально-економічного розвитку країни. Актуальність цієї тематики дослідження посилюється ще й тим, що для значної кількості громадян України підприємництво – це основний вид трудової діяльності та джерело отримання доходів.

Значна кількість внутрішніх та зовнішніх загроз і небезпек, які впливають на ефективність ведення бізнесу в умовах нестабільності, вимагають системного й комплексного підходу до оцінювання та забезпечення економічної безпеки підприємництва.

Економічна безпека підприємництва залежить від широкого кола аспектів, таких як забезпечення фінансової стабільності та фінансової стійкості суб'єкта господарювання, ефективного управління ресурсами та капіталом, зниження ризиків, пов'язаних з нестійкістю економічних систем через вплив глобальних криз, а також пов'язана із захистом комерційної таємниці й конфіденційної інформації. Всі ці аспекти сприяють підвищенню ефективності ведення бізнесу та забезпеченню його довгострокового функціонування і сталого соціально-економічного розвитку. Тому одним із пріоритетних завдань сьогодення є забезпечення і підвищення рівня економічної безпеки підприємництва, так як виявлення і нейтралізація загроз, ризиків та небезпек, правильне діагностування проблем, що впливають на економічну стійкість бізнесу, є важливим для стабільного функціонування підприємництва в поточному періоді та стимулювання його розвитку у майбутньому. Це зумовило необхідність визначення типів стратегій для забезпечення і підвищення рівня економічної безпеки підприємництва за умов глобальної нестабільності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідженню економічної сутності підприємництва, його значущості та специфіки управління, визначенню основних тенденцій та напрямків розвитку суб'єктів підприємницької діяльності в умовах глобальної нестійкості, оптимізації існуючих організаційно-економічних інструментів та механізмів підтримки і стимулювання розвитку українського бізнесу під час війни присвячені праці багатьох вітчизняних науковців-дослідників, таких як Л. Боровік [1], І. Івончак [2], Т. Лиженкова [1], Т. Мединська [3], М. Мельник [3], О. Олійник [1], Т. Осадча [1], М. Стецько [4], І. Федун [4], Н. Шандова [1] та інших.

Теоретико-методичні і прикладні аспекти оцінювання, забезпечення й підвищення рівня економічної безпеки суб'єктів господарювання привертають увагу багатьох вітчизняних дослідників у сфері економіки через ключову роль економічної безпеки у забезпеченні ефективності ведення бізнесу та стимулюванні розвитку підприємництва в умовах нестабільності. Питанням сутності економічної безпеки підприємництва, методичним засадам оцінки її рівня, методам управління та розробленню механізму забезпечення економічної безпеки присвятили наукові праці В. Василега [5], Н. Гордієнко [6], О. Ілляшенко [6], Д. Карлюка [7], Л. Корчевська [8], С. Латкіна [7], О. Литовченко [6], Н. Мєшкова-Кравченко [1], О. Наумова [7], В. Парфьонов [9], Д. Рибась [10], П. Сидорук [9], І. Сисоєнко [7], А. Тарасюк [1], Н. Фролова [11], Н. Шандова [7; 9], Р. Шандов [12] та інші.

Огляд наукової літератури виявив, що сьогодні в умовах глобальної нестійкості проблема пошуку та використання додаткових ефективних інструментів стимулювання розвитку підприємництва в Україні та формування стратегії підвищення його економічної безпеки залишається надзвичайно актуальною.

Формулювання мети дослідження

Метою наукового дослідження є обґрунтування типів стратегій забезпечення і підвищення рівня економічної безпеки за умов глобальної нестабільності та ризиків у контексті стимулювання розвитку підприємництва в Україні.

Викладення основного матеріалу дослідження

Будь-яка економічна система функціонує в умовах нестійкості та невизначеності, що в свою чергу зумовлює вірогідність ризику. Відсутність повної інформації, існування протидіючих тенденцій, елементи випадковості та інші нові економічні умови господарювання обумовлюють важко-прогнозованість процесу управління, оскільки більшість управлінських рішень суб'єктів господарювання приймається в умовах невизначеності й економічного ризику [13].

Питання забезпечення та підвищення рівня економічної безпеки підприємництва особливо гостро стоїть в умовах воєнного стану, коли велика кількість вітчизняних суб'єктів господарювання функціонує у зміненому режимі праці через ворожі обстріли, руйнування інфраструктури, проблеми з енергозабезпеченням, відтоку робочих кадрів закордон, порушення логістики, браку сировини, що призводить до зниження прибутковості бізнесу і навіть до отримання збитків. Невизначеність та постійна зміна умов функціонування суб'єктів господарювання на деяких територіях України через військову агресію з боку росії несуть нові небезпеки і загрози економічній безпеці підприємництва.

Однак, попри це, практика повномасштабної війни між Україною та росією показала, що військовий стан не завжди є кризою для підприємництва. Якщо бути гнучким і швидко реагувати на ринкові зміни, тобто за грамотного управління бізнесом, формується можливість продовжувати роботу в умовах війни, створювати умови для збереження активів та ресурсів і навіть їх розвитку [14].

Тому на тлі зазначеного важливим аспектом для ефективного функціонування вітчизняного підприємництва в умовах воєнного стану є розробка та імплементація системи, що забезпечує високий рівень його економічної безпеки.

Формування безпечних умов для функціонування та розвитку підприємництва стає можливим завдяки створенню системи економічної безпеки. Управління економічною безпекою підприємництва стає важливою передумовою забезпечення його сталого соціально-економічного розвитку та відродження економіки України в цілому.

Економічна безпека підприємництва у широкому розумінні – це стан, за якого забезпечується стабільний розвиток суб'єкта господарювання, його здатність протидіяти внутрішнім та зовнішнім загрозам, а також можливість досягати поставлених цілей. Окрім цього, економічну безпеку підприємництва можна визначити як комплекс заходів та стратегій, спрямованих на захист економічних інтересів суб'єкта господарювання, запобігання економічним втратам, а також забезпечення його фінансової стійкості та підвищення рентабельності.

Для формування стратегій управлінських рішень щодо підвищення економічної безпеки підприємництва відповідно до виявлених потреб і викликів необхідно провести, насамперед, діагностику її рівня. Загальновизнано, що визначення істинного стану економічної безпеки підприємництва є необхідним для прийняття ефективних управлінських рішень. Своєчасне виявлення та нейтралізація загроз сприяють збереженню фінансової стабільності, підвищенню ефективності бізнес-процесів та забезпеченню економічної стійкості підприємництва до різних видів ризиків. Таким чином, основою формування стратегії підвищення економічної безпеки підприємництва служить проведення комплексної оцінки рівня його економічної безпеки.

Господарська діяльність суб'єктів господарювання в умовах воєнного стану та трансформації сучасної економіки України відрізняється значною складністю і вимагає глибокого аналізу, який враховує множину ключових показників. Серед численних аспектів, що впливають на рівень економічної безпеки підприємництва, важливими є забезпечення його фінансової стабільності, ефективне управління ресурсами, зниження ризиків, пов'язаних з динамічними змінами і невизначеністю в умовах воєнного стану, а також захист комерційної таємниці та конфіденційної інформації суб'єкта господарювання. Тож усі ці аспекти сприяють підвищенню економічної безпеки підприємництва та забезпеченню довгострокового функціонування бізнесу і його розвитку.

На основі узагальнення вітчизняних та закордонних напрямів теоретичних досліджень сутності економічної безпеки підприємництва встановлено, що дана дефініція є багатокомпонентною системою, яка складається з численних факторів та показників із різною базою вимірювання. Цей поділ на сегменти умовно пояснюється необхідністю комплексного та системного підходу до захисту підприємництва в умовах глобальної нестабільності від різноманітних загроз.

Проблема визначення критеріїв та інструментів для оцінки рівня економічної безпеки суб'єкта господарювання, що діє у динамічному економічному середовищі, становить суттєву теоретичну, науково-практичну та прикладну проблему. Це підкреслює необхідність розробки нових підходів до вирішення зазначених проблемних аспектів.

Методичні засади оцінки економічної безпеки підприємництва включають використання сукупності показників, прийомів та методів, які дозволяють комплексно аналізувати стан суб'єкта господарювання. З метою оцінки рівня економічної безпеки підприємництва вчені розробили і застосовують велику кількість сучасних підходів, які є універсальними для застосування при оцінюванні економічної безпеки суб'єктів господарювання різних напрямів та сфер діяльності. Однак важливо зазначити, що кожний суб'єкт господарювання за своєю сутністю є унікальним, внаслідок чого вибір методів оцінювання економічної безпеки підприємництва залежить від його галузевої належності, пріоритетів розвитку, стратегічних цілей і завдань, а також від специфіки умов, у яких функціонує суб'єкт господарювання, так як рівень економічної безпеки та проблеми її зміцнення за основними складовими частинами для кожного підприємства є індивідуальними.

Для оцінки економічної безпеки підприємництва використовуються як кількісні, так і якісні методи.

Кількісні методи оцінювання економічної безпеки підприємництва включають використання фінансових показників та коефіцієнтів, таких як рентабельність, коефіцієнти фінансової стійкості, платоспроможності, ліквідності тощо. Показників, які впивають на рівень економічної безпеки підприємництва, при використанні кількісних методів оцінювання існує чимало, проте найбільш влучними, на нашу думку, є наступні: рентабельність активів (ROA), рентабельність власного капіталу (ROE), рентабельність виробництва продукції (товарів, робіт, послуг), рентабельність персоналу, валова маржа (або рентабельність продажу продукції за валовим прибутком), коефіцієнт фінансової стійкості, коефіцієнт автономії, коефіцієнт поточної ліквідності й інші показники ліквідності, показники платоспроможності, продуктивність праці, віддача основних засобів та інші показники зростання, а також ризик і вірогідність його настання – все це необхідно враховувати при формуванні стратегії забезпечення та підвищення економічної безпеки підприємництва (особливо в умовах воєнного стану).

В свою чергу, якісні методи оцінювання рівня економічної безпеки підприємництва передбачають проведення експертної оцінки, SWOT-аналізу, PESTLE-аналізу, системного аналізу, аналізу великих даних (Big Data) й інших методів якісної оцінки для визначення сильних та слабких сторін суб'єкта господарювання, його можливостей і загроз, а також для виявлення трендів. При цьому доцільно використовувати також й інтегральні показники, які враховують сукупність різних факторів та дозволяють отримати більш точну оцінку рівня економічної безпеки підприємництва.

Для діагностики економічної безпеки підприємництва також використовують наступні моделі: п'яти-факторну модель визначення індексу Z, показник Конана-Гольдера, модель Лису та інші моделі [15].

Загалом, економічна безпека підприємництва передбачає створення здорового та стабільного середовища, в якому суб'єкт господарювання може ефективно функціонувати, розвиватися і досягати своїх стратегічних цілей, навіть в умовах нестабільності. Для успішного функціонування кожного суб'єкта господарювання критично важливо визначити істинний стан його економічної безпеки, аби розуміти реальні та потенційні загрози, а також можливості розвитку бізнесу в економічному середовищі. Своєчасне виявлення та нейтралізація таких загроз сприяє збереженню фінансової стабільності, підвищенню ефективності бізнес-процесів і забезпеченню економічної стійкості суб'єкта господарювання до різних видів ризиків та загроз.

Після 24.02.2022 р. через військову агресію росії та початку активних бойових дій в Україні значна частина бізнесу була майже паралізована. Війна спричинила і продовжує завдавати масштабні руйнування інфраструктури в Україні. Навіть якщо активи суб'єктів господарювання залишилися фізично цілими, то порушення логістики та міграція населення суттєво ускладнило ведення бізнесу.

Результати опитування 372 представників бізнесу з усіх куточків України щодо становища українського підприємництва в період воєнного стану, проведеного організацією «Prozorro», наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати опитування щодо становища українського підприємництва в період воєнного стану

Зміни бізнесу у власній діяльності із початком вторгнення рф	Відсоток опитаних підприємців, %
Нічого не змінювали	41 %
Звільнили частину працівників або відправили у простій / відпустку	34 %
Закрили виробництво / офіси / магазини	19 %
Зупинили діяльність або переключились на волонтерство	5 %
Освоїли новий профіль діяльності	4 %

Джерело: складено авторами за матеріалами [16].

Отже, проведене опитування свідчить, що 41 % підприємців із початку вторгнення рф на територію України не змінили хід власної діяльності; 34 % підприємців – довелося звільнити певну частину працівників, вдатися до скорочення заробітних плат та запровадження відпусток; 19 % підприємців – закрили магазини, офіси, виробництва; 4 % підприємців – освоїли нові для себе види діяльності; лише 5 % підприємців повністю зупинили власне функціонування або переключились на волонтерство.

Таким чином, навіть під час війни український бізнес поступово адаптується до нових реалій. Вітчизняні підприємці в умовах воєнного стану трансформуються, модернізуються, шукають нові можливості. В Україні малий та середній бізнес повертається до роботи, проте відновлюється повільніше, ніж великий бізнес.

Для ефективного управління бізнесом та забезпечення його економічної безпеки в поточному періоді, а також для сталого функціонування і розвитку у майбутньому першочерговим завданням є формування стратегії, як основного орієнтиру діяльності суб'єкта господарювання в цьому напрямку.

Погоджуємося з думкою В. Філіппової [17], що потреба у глибокому та всебічному аналізі наявних параметрів сучасного глобального розвитку вимагає розроблення і впровадження довгострокових стратегій, спрямованих на соціальний прогрес, що базується на принципах забезпечення безпеки.

Формування стратегії забезпечення та підвищення рівня економічної безпеки підприємництва є елементом багатопланового управлінського процесу. Це процес, в якому суб'єкт господарювання оцінює поточний стан і загальну динаміку розвитку бізнесу, визначає цілі діяльності та розробляє стратегію їх досягнення із врахуванням всіх релевантних (найсуттєвіших) зовнішніх і внутрішніх умов, а також забезпечує контроль за виконанням розроблених планів, постійно розвиваючись та змінюючись, тобто здійснює довгострокове управління бізнесом.

Стратегії забезпечення економічної безпеки підприємництва залежно від поточного рівня економічної безпеки наведено на рисунку 1.

Отже, пропонується виокремлювати 7 стратегій забезпечення економічної безпеки підприємництва залежно від 5 можливих рівнів економічної безпеки.

В таблиці 2 наведено характеристику запропонованих 7 стратегій забезпечення економічної безпеки підприємництва.

Варто зазначити, що кожний суб'єкт господарювання є унікальним, має свої особливості, характеристики та відмінності, внаслідок чого неможливо розробити універсальний, прийнятний для всіх алгоритм формування стратегії забезпечення та підвищення рівня економічної безпеки підприємництва. Попри вказане, базовими при формуванні зазначеної стратегії мають бути наступні концептуальні засади:

– стратегія забезпечення та підвищення рівня економічної безпеки підприємництва повинна бути сформульована із врахуванням економічної ситуації в країні та особливостей ринкового середовища;

– відповідність стратегії забезпечення та підвищення рівня економічної безпеки підприємництва загальній безпековій стратегії країни загалом, особливо в умовах воєнного стану;

– ключовим орієнтиром при формуванні стратегії забезпечення та підвищення рівня економічної безпеки має бути орієнтованість на місію суб'єкта бізнесу і його загально-корпоративну стратегію, а також на ефективне використання внутрішнього потенціалу;

– необхідно враховувати існування обмежень щодо формування та реалізації стратегії забезпечення і підвищення рівня економічної безпеки підприємництва, які зумовлені поточним, досягнутим рівнем економічної безпеки суб'єкта господарювання та проявами нестабільного зовнішнього середовища;

– спрямованість стратегії забезпечення та підвищення рівня економічної безпеки повинна містити відповідні цілі та завдання, спрямовані на стимулювання розвитку підприємництва;

– ключові елементи стратегії забезпечення та підвищення рівня економічної безпеки підприємництва повинні випливати із специфіки та напрямів діяльності даного конкретного суб'єкта господарювання;

– в основі стратегічного планування забезпечення та підвищення рівня економічної безпеки підприємництва повинні лежати принципи економічної ефективності, багатоваріантності та альтернативності.



Рис. 1. Стратегії забезпечення економічної безпеки підприємництва залежно від поточного рівня економічної безпеки

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2

Характеристика стратегій забезпечення економічної безпеки підприємництва

Стратегія	Характеристика стратегії забезпечення економічної безпеки підприємництва
Стратегія зростання	В основі стратегії зростання лежить збереження достатньо високого поточного рівня економічної безпеки бізнесу, а також подальше посилення системи його захисту від імовірних прогнозованих та неочікуваних небезпек, ризиків і загроз
Стратегія підтримки	Передбачає збереження існуючого стану економічної безпеки суб'єкта бізнесу, контроль результатів діяльності й попередження виникнення можливих ризиків та загроз економічним і соціальним інтересам суб'єкта господарювання
Вибірково- посилююча стратегія	Передбачає проведення заходів, спрямованих на посилення однієї з компонент (або функціональних складових) чи одного з показників економічної безпеки суб'єкта бізнесу, значення яких є недостатнім
«Консервативна» стратегія	Орієнтована на посилення окремих компонент (або функціональних складових) економічної безпеки суб'єкта господарювання, які на поточний момент є «вузьким місцем» («слабкою ланкою») та потребують додаткової уваги
Пристосувальна стратегія або стратегія адаптації	Спрямована на проведення заходів щодо пристосування виду діяльності суб'єкта господарювання до певних економічних умов та навпаки. Пристосувальну стратегію або стратегію адаптації обирають бізнес-суб'єкти із низьким рівнем своєї економічної безпеки
Трансформаційна стратегія або стратегія змін	Передбачає зміни, які стосуються виду діяльності суб'єкта господарювання, зовнішнього ринку та складових економічної безпеки. За потреби суб'єкт господарювання може змінити напрямок діяльності, ринок збуту продукції, закупівельну політику, ціноутворення, технологію виробництва тощо
Стратегія «виживання»	Орієнтована на комплексний захист даного фінансово нестабільного суб'єкта господарювання, який перебуває на межі банкрутства за усіма компонентами (або функціональними складовими) економічної безпеки задля уникнення рейдерського захоплення або банкрутства

Джерело: розроблено авторами

Висновки

Економічна безпека підприємництва є багатокомпонентною системою, що складається з численних показників із різною базою вимірювання, які комплексно характеризують рівень фінансової стабільності суб'єкта господарювання, ефективність управління ресурсами та бізнес-процесами, рентабельність, економічну стійкість до зовнішніх і внутрішніх загроз, а також спроможність суб'єкта господарювання нейтралізувати ризики, пов'язані з динамічними змінами та невизначеністю в умовах воєнного стану.

За результатами проведеного дослідження було проаналізовано теоретико-методичні підходи до формування стратегії забезпечення та підвищення рівня економічної безпеки підприємництва, запропоновано виокремлювати 7 стратегій забезпечення економічної безпеки суб'єктів господарювання залежно від 5 можливих рівнів економічної безпеки.

Результати дослідження можуть бути використані українськими підприємцями під час процесу формування та вибору стратегії забезпечення і підвищення рівня економічної безпеки.

Список використаної літератури

1. Концептуальні підходи та механізми стимулювання розвитку соціально-економічних систем та суб'єктів ринку : монографія / за заг. ред. Н. В. Шандової. Херсон : Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В. С., 2023. 362 с.

2. Івончак І. О. Особливості забезпечення економічної безпеки підприємництва в Україні. *Інтелект XXI*. 2020. № 2. С. 75–80. DOI: https://doi.org/10.32782/2415-8801/2020-2.14

3. Мельник М. І., Мединська Т. В. Механізми підтримки і стимулювання розвитку підприємницького сектору України в умовах війни. *Академічні візії*. 2024. Вип. 36. С. 1–12. URL: https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/1396 (дата звернення: 25.04.2025).

4. Федун І. Л., Стецько М. В. Державне регулювання розвитку малого підприємництва в аграрній сфері. *Економіка та суспільство*. 2023. № 48. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-48-65

5. Василега В. Є. Механізм забезпечення економічної безпеки підприємства в умовах впливу зовнішнього середовища. *Бізнес Інформ*. 2024. № 2. С. 146–153. DOI: https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-2-146-153

6. Литовченко О., Ілляшенко О., Гордієнко Н. Етапи стратегічного планування економічної безпеки підприємства. *Економічний аналіз*. 2021. Т. 31. № 2. С. 98–106. DOI: https://doi.org/10.35774/econa2021.02.98

7. Методи та інструменти аналізу і прогнозування ринкової ситуації в забезпеченні стійкості суб'єктів господарювання : монографія / за заг. ред. Н. В. Шандової. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2021. 280 с. URL: http://kntu.net.ua/ukr/content/view/full/67303

8. Олійник Н. М., Корчевська Л. О., Макаренко С. М. Оцінка інвестиційної складової економічної безпеки Херсонського регіону з метою залучення міжнародних проектів. *Вісник Хмельницького національного університету: Економічні науки*. 2017. № 1. С. 130–134. URL: http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/ekon/pdfbase/2017/VKNU-ES-2017-N1_244.pdf

9. Шандова Н., Сидорук П., Парфьонов В. Метод адаптивного управління економічною безпекою підприємства. *Економічні горизонти*. 2025. № 1(30). С. 44–54. DOI: https://doi.org/10.31499/2616-5236.1(30).2025.321111

10. Олійник Н. М., Рибась Д. Є., Шевченко С. В. Методичні засади оцінки економічної безпеки суб'єктів господарювання. *Стратегічні пріоритети розвитку економіки, менеджменту, сфери обслуговування та права в умовах інтеграційних процесів* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Івано-Франківськ, 07–08 листоп. 2024 р.). Івано-Франківськ, 2024. С. 209–212.

11. Фролова Н. Л. Формування стратегії забезпечення економічної безпеки малого та середнього бізнесу в Україні. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2022. № 80. С. 133–141. DOI: https://doi.org/10.18664/btie.80.286692

12. Олійник Н. М., Шандов Р. А. Принципи управління фінансово-економічною безпекою підприємства. *Модернізація економіки: сучасні реалії, прогнозні сценарії та перспективи розвитку* : матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Херсон – м. Хмельницький, 27–28 квіт. 2023 р.). Херсон, 2023. С. 193–196. URL: https://kntu.net.ua/index.php/eng/content/view/full/58796

13. Макаренко С. М., Олійник Н. М. Бізнес-планування : навч.-метод. посіб. Херсон : ТОВ «ВКФ «СТАР» ЛТД», 2017. 224 с.

14. Костенко Ю., Короленко О., Гузь М. Аналіз фінансової стійкості підприємства в умовах воєнного стану. *Економіка та суспільство*. 2022. № 43. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-43-77

15. Oliinyk N., Makarenko S., Zhytchenko I. "Greening" and intellectualization of transport in the context of ensuring economic security of transportation enterprise. *Review of transport economics and management*. 2021. № 6(22). С. 48–59. DOI: https://doi.org/10.15802/rtem2021/243559

16. Становище бізнесу в період воєнного стану. URL: https://surl.li/cuaohw (дата звернення: 26.02.2025).

17. Філіппова В. Д. Стратегічний механізм забезпечення національної безпеки. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 4(91). С. 437–443. DOI: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.59

References

1. Shandova N. V. (ed.) (2023) Kontseptualni pidkhody ta mekhanizmy stymuliuvannia rozvytku sotsialno-ekonomichnykh system ta subiektiv rynku: monohrafiia [Conceptual approaches and mechanisms to stimulate the development of socio-economic systems and market participants: monograph]. Kherson : FOP Vyshemyrskyi V. S. [in Ukrainian].

2. Ivonchak I. (2020) Osoblyvosti zabezpechennia ekonomichnoi bezpeky pidpryiemnytstva v Ukraini [Features of enterprise economic security in Ukraine]. *Intelekt KhKhI* [*Intellect XXI*], no. 2, pp. 75–80. DOI: https://doi.org/10.32782/2415-8801/2020-2.14

3. Melnyk M., & Medynska T. (2024) Mekhanizmy pidtrymky i stymuliuvannia rozvytku pidpryiemnytskoho sektoru Ukrainy v umovakh viiny [Mechanisms of support and stimulation of the development of the business sector of Ukraine in the conditions of war]. *Akademichni vizii* [*Academic Visions*], no. 36. pp. 1–12. Available at: https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/1396 (accessed: April 25, 2025).

4. Fedun I., & Stetsko M. (2023) Derzhavne rehuliuvannia rozvytku maloho pidpryiemnytstva v ahrarnii sferi [State regulation of the development of small business in the agricultural sphere]. *Ekonomika ta suspilstvo* [*Economy and Society*], no. 48. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-48-65

5. Vasyleha V. Ye. (2024) Mekhanizm zabezpechennia ekonomichnoi bezpeky pidpryiemstva v umovakh vplyvu zovnishnoho seredovyshcha [The Mechanism for Ensuring the Economic Security of the Enterprise under the Influence of the External Environment]. *Biznes Inform* [*Business Inform*], no. 2, pp. 146–153. DOI: https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-2-146-153

6. Lytovchenko O., Illiashenko O., & Gordiyenko N. (2021) Etapy stratehichnoho planuvannia ekonomichnoi bezpeky pidpryiemstva [Stages of strategic planning of economic security of the enterprise]. *Ekonomichnyi analiz* [*Economic analysis*], no. 31(2), pp. 98–106. DOI: https://doi.org/10.35774/econa2021.02.98

7. Shandova N. V. (ed.) (2021) Metody ta instrumenty analizu i prohnozuvannia rynkovoi sytuatsii v zabezpechenni stiikosti subiektiv hospodariuvannia: monohrafiia [Methods and tools for analyzing and forecasting the market situation in ensuring the sustainability of business entities: monograph]. Kherson: OLDI-PLIuS. [in Ukrainian].

8. Oliinyk N. M., Korchevska L. O., & Makarenko S. M. (2017) Otsinka investytsiinoi skladovoi ekonomichnoi bezpeky Khersonskoho rehionu z metoiu zaluchennia mizhnarodnykh proektiv [Evaluation of investment component of the economic security of Kherson region to attract international projects]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu: Ekonomichni nauky* [*Herald of Khmelnytskyi National University. Economic sciences*], no. 1, pp. 130–134.

9. Shandova N., Sydoruk P., & Parfonov V. (2025) Metod adaptyvnoho upravlinnia ekonomichnoiu bezpekoiu pidpryiemstva [Method of adaptive management of economic security of an enterprise]. *Ekonomichni horyzonty* [*Economies' Horizons*], no. 1(30), pp. 44–54. DOI: https://doi.org/10.31499/2616-5236.1(30).2025.321111

10. Oliinyk N. M., Rybas D. Ye., & Shevchenko S. V. (2024) Metodychni zasady otsinky ekonomichnoi bezpeky subiektiv hospodariuvannia [Methodological principles for assessing the economic security of business entities]. *Stratehichni priorytety rozvytku ekonomiky, menedzhmentu, sfery obsluhovuvannia ta prava v umovakh intehratsiinykh protsesiv*: materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (Ivano-Frankivsk, November 07–08, 2024), pp. 209–212.

11. Frolova N. L. (2022) Formuvannia stratehii zabezpechennia ekonomichnoi bezpeky maloho ta serednoho biznesu v Ukraini [Formation of a strategy for ensuring the economic security of small and medium-sized businesses in Ukraine]. *Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti* [*The bulletin of transport and industry economics*], no. 80. pp. 133–141. DOI: https://doi.org/10.18664/btie.80.286692

12. Oliinyk N. M., & Shandov R. A. (2023) Pryntsypy upravlinnia finansovo-ekonomichnoiu bezpekoiu pidpryiemstva [Principles of management of financial and economic security of the enterprise]. *Modernizatsiia ekonomiky: suchasni realii, prohnozni stsenarii ta perspektyvy rozvytku*: materialy V Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii [*Modernization of economy: current realities, forecast scenarios and development prospects*: materials of V International scientific-practical conference] (Kherson – Khmelnytskyi, April 27–28, 2023), pp. 193–196.

13. Makarenko S. M., & Oliinyk N. M. (2017) Biznes-planuvannia: navchalno-metodychnyi posibnyk [Business planning: study guide]. Kherson : VKF "STAR" LTD. [in Ukrainian].

14. Kostenko Y., Korolenko O., & Huz M. (2022) Analiz finansovoi stiikosti pidpryiemstva v umovakh voiennoho stanu [Financial stability analysis of the enterprise under martial law]. *Ekonomika ta suspilstvo* [*Economy and Society*], no. 43. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-43-77

15. Oliinyk N., Makarenko S., & Zhytchenko I. (2021) "Greening" and intellectualization of transport in the context of ensuring economic security of transportation enterprise. *Review of transport economics and management*. no. 6(22), pp. 48–59. DOI: https://doi.org/10.15802/rtem2021/243559

16. Stanovyshche biznesu v period voiennoho stanu [Business situation during martial law]. Available at: https://surl.li/cuaohw (accessed: February 26, 2025).

17. Filippova V. D. (2024) Stratehichnyi mekhanizm zabezpechennia natsionalnoi bezpeky [Strategic mechanism for ensuring national security]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu* [*Visnyk of Kherson National Technical University*], no. 4(91), pp. 437–443. DOI: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.59

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 06.06.2025.
Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman. Папір офсет. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 45,11. Замов. № 0825/634. 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.