

Системи та технології

(правонаступник наукового журналу
“Вісник Академії митної служби України.
Серія: “Технічні науки”)

№ 1 (71)

Науковий журнал включено до Переліку наукових фахових видань України категорії “Б”, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів з галузі “Технічні науки”, спеціальності D3 Менеджмент; F1 Прикладна математика; F3 Комп’ютерні науки; F5 Кібербезпека та захист інформації; F7 Комп’ютерна інженерія; G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка; G11 Машинобудування (за спеціалізаціями); J2 Готельно-ресторанна справа та кейтеринг; J5 Морський та внутрішній водний транспорт; J6 Авіаційний транспорт; J7 Залізничний транспорт; J8 Автомобільний транспорт.



Видавничий дім
«Гельветика»
2026

Системи та технології
(правонаступник наукового журналу
“Вісник Академії митної служби України. Серія: “Технічні науки”)
Науковий журнал. Видається двічі на рік. Заснований у травні 1999 р.
Рекомендовано до друку та до поширення через мережу Інтернет вченою радою
Університету митної справи та фінансів (протокол № 7 від 26 січня 2026 р.)

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення
StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

Редакційна колегія:

Кузьменко А. І. – к.т.н., доц.
(головний редактор);
Халіпова Н. В. – к.т.н., доц.
(заступник головного редактора);
Прокопович-Ткаченко Д. І. – к.т.н., доц.
(заступник головного редактора);
Йозеф Костольни – PhD;
Ян Рабчан – PhD;
Бакіров Мюшфік Панах огли – к.т.н.;
Балацька Н. Ю. – д.е.н., доц.;
Бондаренко І. О. – д.т.н., доц.;
Боярчук А. В. – к.т.н., доц.;
Брежнев Є. В. – д.т.н., с.н.с.;
Вишнікіна О. В. – к.х.н., доц.;
Власов А. В. – к.т.н., ст. докл.;
Волосова Н. М. – к.т.н.;
Гарт Е. Л. – д.ф.-м.н., проф.;
Гордєєв О. О. – к.т.н., доц.;
Джинджоян В. В. – д.е.н., доц.;
Доценко С. І. – д.т.н., доц.;
Защолкін К. В. – к.т.н., доц.;
Котух Є. В. – к.т.н.;

Кузін М. О. – д.т.н., доц.;
Кучер М. М. – к.е.н., доц.;
Маргинюк О. М. – к.т.н., доц.;
Музикін М. І. – к.т.н., доц.;
Нестеренко Г. І. – к.т.н., доц.;
Огар О. М. – д.т.н., проф.;
Охріменко Т. О. – к.т.н.;
Поночовний Ю. Л. – д.т.н., проф.;
Примаченко Г. О. – к.т.н., доц.;
Прохорченко Г. О. – к.т.н., доц.;
Сабіров О. В. – к.т.н., доц.;
Сохацький А. В. – д.т.н., проф.;
Стеблюк Н. Ф. – к.е.н., доц.;
Стеблянко П. О. – д.ф.-м.н.;
Чопоров С. В. – д.т.н., проф.;
Шапорін Р. О. – к.т.н., доц.;
Щербовських С. В. – д.т.н., с.н.с.;
Юдіна О. І. – д.е.н., доц.;
Язіна В. А. – к.е.н.;
Яремчук С. О. – к.т.н.

DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2026-1-71>
ISSN 2521-6643

Коректори: Н. В. Славогородська, Н. С. Ігнатова
Комп'ютерна верстка: Т. О. Клименко

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа: Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення
№ 1136 від 11.04.2024 року. Ідентифікатор медіа: R30-03967.

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Університет митної справи та фінансів (вул. Володимира Вернадського, 2/4, 49000,
м. Дніпро, e-mail: university.msf@gmail.com, umfsf.ua@gmail.com, Тел.: (056) 745-55-96).

Періодичність видання: 2 рази на рік.

Мови розповсюдження: українська, англійська, польська, німецька, французька, італійська, литовська.

Адреса: м. Дніпро, вул. Володимира Вернадського, 2/4, 49000
Тел.: +38 (099) 729 63 79
E-mail: editor@st.umfsf.in.ua
Сайт видання: st.umfsf.in.ua

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефони: +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.

Дата розміщення онлайн: 27.01.2026. Дата друку: 03.02.2026.
Формат 60×84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 27,20. Обл.-вид. арк. 23,79.
Наклад 100 прим. Замовлення № 0226/188.

Засновник: Університет митної справи та фінансів

ЗМІСТ

ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА

Лаврик В. В., Сукало М. Л. Математичне моделювання нечіткої комунікації в багатороботних системах на основі псевдоаналогових сигналів.....	7
Марчук А. Р., Ярецька Н. О. Візуалізація лінійної алгебри як інструменту прикладної математики: досвід упровадження GeoGebra у освіту майбутніх інженерів програмного забезпечення.....	15
Pasichnyk V. A., Pasichnyk A. N., Riabenko V. I. Mathematical models and algorithms of cryptographic data protection in distributed information systems.....	21
Сохацький А. В. Моделювання турбулентних течій навколо наземних транспортних апаратів з застосуванням гібридних підходів.....	28

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

Гуменюк А. О., Отрох С. І. Підвищення доступності даних у пірінгових системах з адресацію вмісту за рахунок проактивної реплікації.....	39
Завгородня Г. А., Завгородній В. В. Оптимізація продуктивності комп'ютерних ігор на основі методів машинного навчання.....	45
Зайцева Т. А., Гончаров Я. А. Застосування адаптивних методів у чисельному моделюванні задач механіки.....	52
Зінченко А. Ю. Еволюційна оптимізація архітектури згорткових нейронних мереж у задачах інтелектуального аналізу даних.....	59
Крамар Ю. М., Вітківська І. І., Жаріков Е. В., Радіонов П. Ю. Метод формування груп А/В-тестів із мінімальним взаємним впливом із застосуванням алгоритму Стоера–Вагнера.....	68
Молчанова М. О., Андрощук В. І., Шурипа М. О., Мазурець О. В. Об'єктно-орієнтований підхід до нейромережевого виявлення суб'єктів кібербулінгу за повідомленнями у керованому хмарному середовищі.....	73
Онищенко А. О., Бочаров Б. П., Костенко О. Б. Прогнозування ефективності пошукової оптимізації із використанням SVM: дані, моделювання та валідація.....	81
Отрох С. І., Кублій Л. І., Защинська М. О., Моніторинг стану розумного будинку за технологією IoT.....	87
Поперешняк С. В. Класифікаційно-структурний підхід до оцінювання випадковості коротких бінарних послідовностей у системах криптографічного захисту та IoT-телеметрії.....	92
Розум М. В., Ігнат'єва К. М. Комплексний аналіз рішень: інформаційна система на основі класичних критеріїв.....	101
Romanuke V. V. Smart contracts in decentralized energy markets: opportunities and regulatory challenges.....	107
Ульяновська Ю. В., Рудянова Т. М., Чуванько М. С. Основні аспекти розробки мобільного додатку для оптимізації поставок та виконання внутрішніх завдань з урахуванням ролей.....	118
Shyshkanova G. A., Zaytseva T. A., Zhyr S. I., Korotunova O. V. Intellectual decisions to compressive sensing for efficient data acquisition in wireless sensor networks.....	128

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ

Савченко Ю. В., Воскобойник В. О., Корнейко О. В., Зудова С. М. Лінійні рекурентні співвідношення у системі симетричних алгоритмів шифрування.....	136
---	-----

МЕНЕДЖМЕНТ

Muzykin M. I., Nesterenko H. I., Bibik S. I., Barkalova N. O. Logistics management of motor vehicle terminal operations as a queuing system.....	146
---	-----

Перкун І. В., Погребняк В. Г., Вишнікіна О. В., Погребняк А. В. Принципи інтеграції екологічного нормування та стандартів безпеки життєдіяльності в стратегії постконфліктного відновлення України.....	156
Погребняк В. Г., Гапоненко С. О., Рудянова Т. М., Погребняк А. В. Сучасні підходи до управління ризиками в системі безпеки на промислових підприємствах.....	164
Роздобудько Е. В., Стеблюк Н. Ф., Кучер М. М., Данилишин В. С. Адаптація та стійкість малоформатного ритейлу: стратегічні підходи в умовах кризових трансформацій.....	176

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

Дрожжин О. Л., Берестенко В. В. Флексітанки в технології перевезення «bag-in-box»: поточення терміну на базі функціональної ролі.....	184
--	-----

МАШИНОБУДУВАННЯ (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЯМИ)

Кутковецька Т. О. Огляд та модернізація робочих органів знарядь для поверхневого обробітку ґрунту.....	192
---	-----

ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННА СПРАВА ТА КЕЙТЕРИНГ

Горб К. М., Корнєєв М. В., Небаба Н. О., Сайгак Є. Л. Готельний сервіс на транспортних засобах в туристичному обслуговуванні: загальні засади та напрями досліджень.....	197
Horozhankina N. A., Razinkova M. Yu., Sabirov O. V., Mulyenko K. O. Innovative activities in the hotel and restaurant business.....	205
Kucher M. M., Korneyev M. V., Shchokolova H. V., Stepaniuk B. V. Practical methods of service quality management in establishments of restaurant industry.....	211
Stebliuk N. F., Horozhankina N. A., Nebaba N. O., Shapoval K. O. Optimization of taxation of restaurant business establishments in the context of sustainable development.....	220

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

Огліх В. В., Шаповалов О. В., Кузьменко А. І., Лісунова В. В. Моделювання взаємозв'язків у транспортних системах із застосуванням методу аналізу відповідностей.....	228
---	-----

CONTENTS

APPLIED MATHEMATICS

- Lavrik V. V., Sukalo M. L.** Mathematical modeling of fuzzy communication in multi-robot systems based on pseudoanalog signals.....7
- Marchuk A. R., Yaretska N. O.** Visualization of linear algebra as a tool of applied mathematics: experience of implementing geogebra in the education of future software engineers.....15
- Pasichnyk V. A., Pasichnyk A. N., Riabenko V. I.** Mathematical models and algorithms of cryptographic data protection in distributed information systems.....21
- Sokhatskyi A. V.** Modeling of turbulent flows around ground transport vehicles using hybrid approaches.....28

COMPUTER SCIENCES

- Humeniuk A. O., Otrokh S. I.** Improving Data Availability in Peer-to-Peer Content-Addressed Systems through Proactive Replication..... 39
- Zavhorodnia G. A., Zavhorodnii V. V.** Optimization of computer game performance using machine learning methods..... 45
- Zaytseva T. A., Honcharov Ya. A.** Application of adaptive methods in numerical modeling of mechanics problems....52
- Zinchenko A. Yu.** Evolutionary optimization of convolutional neural network architectures in intelligent data analysis tasks..... 59
- Kramar Yu. M., Vitkovska I. I., Zharikov E. V., Radionov P. Yu.** Method for forming A/B test groups with minimal interference using the Stoer–Wagner algorithm.....68
- Molchanova M. O., Androshchuk V. I., Shurypa M. O., Mazurets O. V.** Object-oriented approach to neural network-based detection of cyberbullying subjects from messages in a managed cloud environment..... 73
- Onyshchenko A. O., Bocharov B. P., Kostenko O. B.** Prediction of seo effectiveness using SVM: data, modeling, and validation..... 81
- Otrokh S. I., Kublii L. I., Zashchytynska M. O.** Monitoring the status of a smart home using IoT technology.....87
- Poperehnyak S. V.** A Classification–Structural Approach to Randomness Evaluation of Short Binary Sequences in Cryptographic Protection Systems and IoT Telemetry..... 92
- Rozum M. V., Ihnatieva K. M.** Comprehensive decision analysis: information system based on classical criteria.....101
- Romanuke V. V.** Smart contracts in decentralized energy markets: opportunities and regulatory challenges.....107
- Ulyanovska Yu. V., Rudyanova T. M., Chuvanko M. S.** Core aspects of developing a mobile application for supply chain optimization and role-based management of internal tasks..... 118
- Shyshkanova G. A., Zaytseva T. A., Zhyr S. I., Korotunova O. V.** Intellectual decisions to compressive sensing for efficient data acquisition in wireless sensor networks..... 128

CYBERSECURITY AND DATA PROTECTION

- Savchenko Iu. V., Voskoboinyk V. O., Korneiko O. V., Zydova S. M.** Linear recurrent relations in the system of symmetric encryption algorithms.....136

MANAGEMENT

- Muzykin M. I., Nesterenko H. I., Bibik S. I., Barkalova N. O.** Logistics management of motor vehicle terminal operations as a queuing system.....146
- Perkun I. V., Pogrebnyyak V. G., Vyshnikina O. V., Pogrebnyyak A. V.** Principles of Integrating Ecological Standardization and Life Safety Standards into Ukraine’s Post-Conflict Recovery Strategies.....156

Pogrebnyak V. G., Haponenko S. O., Rudianova T. M., Pogrebnyak A. V. Modern approaches to risk management in the safety system at industrial enterprises.....164

Rozdobudko E. V., Stebliuk N. F., Kucher M. M., Danilyshyn V. S. Adaptation and resilience of small-format retail: strategic approaches in times of crisis transformations.....176

ARITIME AND INLAND WATER TRANSPORT

Drozhhyn O. L., Berestenko V. V. Flexitanks in bag-in-box transportation technology: term revision based on functional role.....184

MECHANICAL ENGINEERING (WITH SPECIALIZATIONS)

Kutkovetska T. O. Inspection and modernization of working bodies tool for surface treatment of soil.....192

HOTEL AND RESTAURANT BUSINESS AND CATERING

Horb K. M., Korneyev M. V., Nebaba N. O., Saihak Ye. L. Hotel service on vehicles in tourist services: general principles and directions of research.....197

Horozhankina N. A., Razinkova M. Yu., Sabirov O. V., Mulenko K. O. Innovative activities in the hotel and restaurant business.....205

Kucher M. M., Korneyev M. V., Shcholokova H. V., Stepaniuk B. V. Practical methods of service quality management in establishments of restaurant industry.....211

Stebliuk N. F., Horozhankina N. A., Nebaba N. O., Shapoval K. O. Optimization of taxation of restaurant business establishments in the context of sustainable development.....220

ROAD TRANSPORT

Ohlikh V. V., Shapovalov A. V., Kuzmenko A. I., Lisunova V. V. Modeling interrelations in transport systems using the method of correspondence analysis.....228

ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА

УДК 681.518.54

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2026-1-71.1>

Лаврик В. В., кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри прикладної фізики та вищої математики
Київського національного університету технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-6448-2470

Сукало М. Л., доктор філософії, старший викладач кафедри
інформаційних та комп'ютерних технологій,
Київського національного університету технологій та дизайну
ORCID: 0000-0003-3437-8290

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЧІТКОЇ КОМУНІКАЦІЇ В БАГАТОРОБОТНИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ ПСЕВДОАНАЛОГОВИХ СИГНАЛІВ

У статті представлено результати дослідження, присвяченого моделюванню комунікації у багатороботних системах з використанням нечітких (псевдоаналогових) сигналів. У сучасних умовах, коли групи автономних роботів функціонують у складних та динамічно змінюваних середовищах, надзвичайно актуальними є завдання забезпечення ефективного, стійкого та енергоощадного інформаційного обміну між роботами. Традиційні підходи до міжроботної комунікації – здебільшого дискретні – не дозволяють досягти високої адаптивності у шумних або обмежених за ресурсами середовищах. У відповідь на ці виклики автором запропоновано гібридну модель, яка імітує принципи комунікації, властиві біологічним системам, зокрема – варіабельність аналогових сигналів, що використовується у зграях тварин або колоніях комах.

Розроблена математична модель базується на концепції нечіткої логіки, де кожен сигнал має три параметри – амплітуду, частоту та тривалість – інтерпретовані у лінгвістичних категоріях (високий / середній / низький, тривожний / командний тощо). Ступінь відповідності сигналу визначається функціями належності, що дозволяє кожному роботу формувати гнучку реакцію залежно від контексту. Проведено серію експерименту у симуляційному середовищі, у якому «Леві» переслідували «Антилоп», що мали можливість обмінюватись сигналами про небезпеку або нестачу енергії. Було змодельовано три типи середовищ – без перешкод (базова дискретна модель), з втратами сигналів та зі спотворенням сигналів при псевдоаналоговій передачі.

Результати показали, що нечітка модель дозволяє досягти такого ж рівня виживання роботів, як і в умовах ідеальної передачі дискретних сигналів, але з енергоспоживанням, зниженим на 18 %. При цьому система виявилась стійкішою до втрат або спотворення сигналів. Застосування аналогоподібної комунікації з лінгвістичною інтерпретацією дозволяє уникати надмірної активації роботів, підвищуючи загальну ефективність групової поведінки. Запропонована модель може бути використана для побудови розподілених технічних систем у сферах пошуково-рятувальних операцій, розвідки, а також у сфері low-cost swarm robotics.

Стаття робить внесок у розвиток гнучких комунікаційних протоколів для роїв роботів, здатних адаптуватись до змін середовища без централізованого управління.

Ключові слова: роєва робототехніка, децентралізоване керування, нечітка логіка, розподілений інтелект.

Lavrik V. V., Sukalo M. L. Mathematical modeling of fuzzy communication in multi-robot systems based on pseudoanalog signals

The article presents the results of a study devoted to modeling communication in multi-robot systems using fuzzy (pseudo-analog) signals. In modern conditions, when groups of autonomous robots operate in complex and dynamically changing environments, the tasks of ensuring effective, stable and energy-saving information exchange between agents are extremely relevant. Traditional approaches to inter-robot communication – mostly discrete and based on rigid binary protocols – often do not allow achieving sufficient adaptability in noisy, unstructured or resource-limited environments. They tend to rely on constant signal retransmission and error-correction procedures, which increases energy costs and reduces real-time responsiveness.

In response to these challenges, the author proposed a hybrid model that imitates the principles of communication inherent in biological systems, in particular the variability and context dependence of analog signals used in flocks of birds, schools



© В. В. Лаврик, М. Л. Сукало, 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

of fish or insect colonies. Such natural communication is not strictly digital: it combines amplitude, frequency and temporal modulation, enabling organisms to convey uncertainty, urgency or intent even under external disturbances.

The developed mathematical model applies the concept of fuzzy logic, in which each transmitted signal is represented by three parameters – amplitude, frequency and duration – interpreted in linguistic categories such as high, medium, low, alert or coordination. Membership functions determine the degree to which a received signal corresponds to a specific linguistic value, enabling each agent to form a flexible response depending not only on the signal itself but also on the situational context. This reduces the need for exact matching of discrete messages and allows communication to remain functional even when signals are partially lost or distorted.

A series of experiments was conducted in a simulation environment representing predator–prey interactions, in which “Lions” acted as pursuing agents while “Antelope” could exchange messages about detected danger or decreasing energy reserves. Three categories of environments were modeled: a basic scenario with ideal discrete communication, a scenario with partial signal loss, and one with distortion introduced during pseudoanalog transmission. The results demonstrated that the fuzzy model enables maintaining the same level of agent survival and task completion efficiency as in ideal discrete communication, while reducing overall energy consumption by approximately 18 %. Furthermore, the swarm demonstrated significantly higher robustness under conditions of interference or incomplete data, as fuzzy interpretation prevented critical communication breakdowns.

The use of analog-like communication with linguistic interpretation decreases unnecessary agent activation, smooths collective decision-making and increases the overall efficiency of group behavior. The proposed model can be applied to the development of distributed technical systems for search-and-rescue missions, reconnaissance, environmental monitoring, agricultural robotics and low-cost swarm systems, where adaptability and resilience are more critical than precision. The article contributes to the advancement of flexible decentralized communication protocols capable of maintaining functionality under uncertainty and without centralized control.

Key words: swarm robotics, decentralized control, fuzzy logic, distributed intelligence.

Постановка проблеми. У сучасних робототехнічних системах зростає важливість ефективної організації управління групами автономних роботів, що працюють у складних та динамічно змінюваних середовищах. Забезпечення їх узгоджених дій є ключовим як для досягнення поставлених цілей, так і для підвищення надійності та стійкості до зовнішніх і внутрішніх збурень.

У роботі [1] наведено результати досліджень щодо організації групового управління роботами в умовах високої мінливості середовища. Виділено три основні підходи до такого управління: централізований, децентралізований та змішаний. Централізовані моделі простіші у реалізації, але вразливі до відмови центрального вузла та погано масштабуються. Децентралізовані системи стійкіші та краще масштабуються, проте складніші у забезпеченні узгодженості дій. Водночас відсутні універсальні підходи, які б забезпечували ефективність для різних задач – координації руху, побудови формацій, розподілу завдань чи організації взаємодії [2]. Складність моделей, велика кількість ступенів свободи та різноманітність сценаріїв обмежують можливість створення універсальних рішень.

Одним із напрямів подолання цих труднощів є використання моделей соціальної поведінки біологічних систем, де інформаційний обмін базується на локальній взаємодії найближчих сусідів. У роботах [3] показано ефективність природних механізмів комунікації в зграях птахів, косяках риб чи колоніях комах, які забезпечують стійкість до шумів і змін середовища. Загалом процес обробки сигналів у таких системах описується залежністю:

$$R_i = f(S, C), \quad (1)$$

де S – сукупність зовнішніх сигналів, C – внутрішній стан особи, R_i – множина можливих реакцій (дій).

Проте, як зазначено в [4], природні сигнали є аналоговими та розмитими, що ускладнює їх точну формалізацію. Один сигнал може виконувати кілька функцій, наприклад пісня зяблика одночасно маркує територію та приваблює самиць.

Отже, подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку методів інформаційного обміну між роботами на основі аналогових сигналів, що імітують біологічні механізми комунікації. Це дозволить створювати адаптивні та стійкі до збурень системи управління, здатні до самостійного пристосування без зовнішньої координації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Запропонований напрям є перспективним для розв’язання задач управління великими групами автономних роботів у реальних середовищах, особливо за умов обмеженої пропускну здатності каналів зв’язку та високої динамічності обстановки. Саме дослідженню таких підходів доцільно присвятити подальші наукові роботи.

У роботі [5] наведено результати досліджень щодо організації комунікацій у розподілених технічних системах, зокрема групах роботів. Основну увагу приділено розробці мов для обміну даними, каналів зв’язку та комунікаційних протоколів. У [6] розглянуто ІК-канал обміну даними у великих групах роботів, а в [7] – спеціалізовані мови типу SWARMORPH-script, орієнтовані на вирішення конкретних задач у ройових системах. Також досліджено можливість використання традиційних протоколів, таких як CSMA/CD, та спеціалізованих рішень для узгодженого руху рою роботів [8].

Термін «рой роботів» сформувався у 1990-х роках на основі концепції Swarm Intelligence, запропонованої Beni та Wang у 1989 році для опису взаємодії великої кількості простих агентів [9]. Систематичні дослідження цього напрямку були започатковані E. Şahin, який у 2005 році дав одне з перших визначень swarm robotics та підкреслив значення природних механізмів колективної поведінки.

Проте й нині залишаються невирішені питання, передусім методологічні, що пов'язані з принциповими відмінностями між технічними й біологічними системами. До них належать апаратні обмеження, відсутність можливості повноцінної аналогової передачі сигналів, нестача сенсорних здатностей, подібних до рецепторів живих організмів, а також вимога зберігати дешевизну конструкції для великих груп роботів.

Одним з можливих шляхів подолання цих обмежень є використання принципів етології, зокрема ідеї інваріантної форми сигналу. У роботі [10] підкреслено роль варіабельності сигналів у біологічних системах для підвищення стійкості передачі інформації. Однак у технічних системах аналогові канали є обмеженими, тому виникає потреба у їх імітації на основі дискретних механізмів.

У цій роботі запропоновано новий підхід до міжагентної комунікації, що ґрунтується на імітації аналогових сигналів через дискретні канали зв'язку. Створена математична модель нечіткої (псевдоаналогової) комунікації враховує амплітуду, частоту та тривалість сигналу, забезпечуючи контекстно залежну реакцію агентів без централізованого управління.

Таким чином, модель псевдоаналогової міжроботної комунікації є перспективним інструментом для побудови адаптивних, стійких і енергоефективних багатороботних систем, здатних працювати в умовах невизначеності та інформаційних втрат. Вона відкриває можливості для подальшого розвитку нечітких протоколів взаємодії у децентралізованих робототехнічних платформах.

Мета дослідження. Метою даної статті є розробка та дослідження математичної моделі псевдоаналогової (нечіткої) комунікації в багатороботних системах, що функціонують у складних та зашумлених середовищах для підвищення енергетичної ефективності, стійкості до втрат сигналів та адаптивності до взаємодії руху рою роботів.

Викладення основного матеріалу дослідження.

1. Організація комунікації в групі роботів

У багатороботних системах навіть за спрощеної конструкції кожен робот повинен орієнтуватися відносно сусідів у межах радіуса прийому сигналів, що забезпечує локальну взаємодію та координацію. Для цього робот має визначати відносне положення інших роботів, наприклад «робот N знаходиться зліва». Це може бути реалізовано через визначення координат за допомогою зовнішніх маяків [11] або шляхом обчислення власного положення з використанням енкодерів та коригувальних алгоритмів [12].

Схематичний принцип визначення напрямку наведено на рис. 1: робот N орієнтується вперед і поділяє простір на чотири сектори – вперед, назад, ліворуч, праворуч. Якщо сигнал від робота K надходить, наприклад, правим приймачем, робот N робить висновок про розташування K праворуч. Цей підхід забезпечує базову просторову орієнтацію без складних сенсорів або глобальних координат.

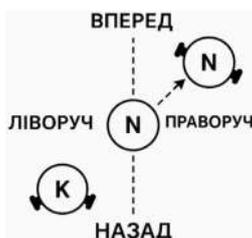


Рис. 1. Основні визначення відносного місця розташування сусіднього робота

Проте координатні методи часто потребують додаткового обладнання та значних обчислювальних ресурсів, тому для простих платформ доцільним є використання орієнтації відносно власного корпусу робота. Одним із найпростіших варіантів реалізації є направлена передача та прийом сигналів. Така схема застосована, наприклад, у платформі Jasmine [13], де використовуються декілька напрямлених приймачів. Використання чотирьох приймальних модулів з полем огляду близько 90° дозволяє роботам визначати один одного за принципом секторного аналізу, знижуючи вимоги до обчислювальних ресурсів.

Щодо каналів зв'язку, аналіз сучасних підходів показує домінування радіозв'язку (Wi-Fi, Ad hoc, сенсорні мережі). Однак радіоканал має недолік – відсутність природної спрямованої передачі, що обмежує можливості реалізації локальної взаємодії рою. У якості альтернатив розглядаються інфрачервоний та звуковий канали. У роботі [10] показано ефективність ІЧ-каналу для локальної взаємодії. На рис. 2 подано схеми ІЧ та акустичного каналів: перший забезпечує спрямовану передачу у вигляді вузького конуса випромінювання, другий – передачу акустично модульованих сигналів, які можуть кодувати інформацію за частотою, тривалістю чи амплітудою.

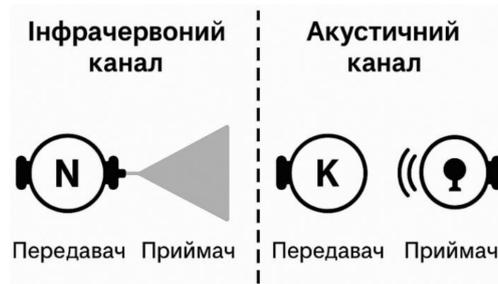


Рис. 2. Структура інфрачервоного та акустичного каналів зв'язку між роботами

Звукові методи також досліджено в роботі [14], де запропоновано формальну мовну модель, у якій кожен символ передається набором багаточастотних сигналів тривалістю 150 мс. Іншим прикладом є ультразвукова комунікація, використана в іграшці Furby. Обидва канали придатні для ройових систем, де пропускна здатність визначається швидкістю роботи та вимогами до часу реакції, який не повинен перевищувати 0,2 с.

У межах запропонованого підходу канал зв'язку використовується не для передачі цифрових повідомлень, а для емулявання аналогових сигналів. Передаються параметри – амплітуда, частота, тривалість, – які формують нечіткий псевдоаналоговий сигнал, що дозволяє роботам інтерпретувати його та формувати поведінкову реакцію без складних комунікаційних протоколів.

2. Математична модель взаємодії та комунікації в багатороботних системах

Запропонована схема взаємодії та комунікації в групі роботів ґрунтується на гібридному підході, що поєднує дискретну передачу даних з елементами аналогового кодування. Кожен робот оснащений простим приймально-передавальним модулем, здатним розпізнавати варіації сигналу та інтерпретувати їх як зміну пріоритету або ступеня важливості повідомлення (рис. 3).



Рис. 3. Структура взаємодії та комунікації в групі роботів

Робота системи відбувається у кілька етапів. Спочатку лідер генерує базовий інваріантний сигнал, що ініціює спільну дію (наприклад, старт руху). Підлеглі роботи приймають цей сигнал і відповідно до його параметрів визначають інтенсивність виконання команди. Якщо окремі роботи фіксують перешкоди, вони формують змінений варіант сигналу – із збільшеною амплітудою чи тривалістю – передаючи інформацію про загрозу сусідам або лідеру. Подальша поведінка групи визначається інтеграцією всіх отриманих повідомлень, що забезпечує колективне рішення щодо корекції руху або зміни тактики.

Для досягнення природоподібної взаємодії використовується модель обробки аналогових сигналів із нечіткою інтерпретацією. Сигнал описується набором параметрів:

$$S(t) = \{A(t), f(t), d(t)\}, \quad (2)$$

де:

- $A(t)$ – амплітуда сигналу (відповідає інтенсивності або ступеню терміновості);
- $f(t)$ – несуча частота сигналу (якісна характеристика: тип чи категорія повідомлення);
- $d(t)$ – тривалість сигналу (часова розтягнутість або значущість).

Для кожного лінгвістичного терму визначається функція належності $\mu(x)$, яка дозволяє оцінити ступінь відповідності значення сигналу певній категорії.

Кожен робот R_p , отримуючи сигнал $S_j(t)$ від робота-сусіда R_p , формує оцінку важливості сигналу за допомогою композиційної функції:

$$P_{ij}(t) = \mu_A(A_j(t)) \cdot \mu_f(f_j(t)) \cdot \mu_d(d_j(t)), \quad (3)$$

де $P_{ij}(t) \in [0, 1]$ – ступінь релевантності сигналу для робота R_i .

Рисунок 4 демонструє узагальнену блок-схему обробки аналогових сигналів. Модель включає: прийом сигналу, перетворення параметрів у лінгвістичні оцінки, вибір реакції і виконання дії з інтенсивністю, пропорційною амплітуді сигналу. Такий підхід забезпечує адаптивність і дозволяє відмовитися від жорсткого програмування всіх можливих ситуацій.



Рис. 4. Узагальнена блок-схема нечіткої моделі обробки аналогових сигналів у рою роботів

Застосування дискретного каналу з варіативними характеристиками сигналу дає змогу моделювати аналогову комунікацію, підвищуючи стійкість системи до завад та забезпечуючи більш інформативний обмін. Це обґрунтовує необхідність подальших досліджень у напрямку розробки методів комунікації в роботизованих групах, які імітують властивості природних аналогових сигналів.

3. Загальний опис задачі та експериментальна постановка

Для дослідження переваг нечіткої (псевдоаналогової) комунікації в умовах колективної поведінки було проведено серію експериментів з використанням імітаційного моделювання. Модель описувала взаємодію рою роботів, що переміщувались по тороїдальній поверхні. Розглядалися два типи агентів: «леви», які переслідували інші об'єкти, та «антилопи», що намагалися уникнути переслідування. Кожен робот мав запас енергії, який витрачався на рух. У випадку захоплення «антилопи» її енергія передавалася «леву», а сама вона вважалась спійманою.

Роботи взаємодіяли лише локально. «Леви» діяли автономно і сигналів не передавали, тоді як «антилопи» мали два типи широкомовних повідомлень: сигнал «небезпека» при виявленні «лева» та сигнал «прохання про допомогу» при нестачі енергії. Обидва повідомлення передбачали лише ретрансляцію.

Поведінкові правила «антилоп» включали: випадкове блукання у нормальному стані, передачу сигналу «небезпека» та втечу при візуальному контакті з «левом», диференційовану реакцію на отриманий сигнал залежно від умов експерименту, а також наближення до джерела сигналу «прохання» для перерозподілу енергії. Пріоритетність сигналів визначалася змістом («небезпека» завжди домінує) та інтенсивністю.

У всіх експериментах використовувалися єдині параметри руху: швидкість «лева» – 6, швидкість «антилопи» – 4, радіус огляду «лева» – 12, радіус огляду/чутності «антилопи» – 24. Така асиметрія забезпечувала перевагу колективної ретрансляції сигналів.

Було розглянуто дві стратегії передачі інформації:

- дискретна модель, у якій сигнал або є, або відсутній, і всі роботи в зоні дії реагують однаково;
- аналогова (нечітка) модель, де сигнал має параметри інтенсивності та тривалості, що формують ступінь його важливості.

У дискретному випадку будь-який прийнятий сигнал спричиняв масову активацію роботів, що приводило до підвищених енерговитрат. Натомість аналогова модель дозволяла формувати градуйовану реакцію – ближчі агенти активувались сильніше, віддалені могли ігнорувати сигнал або реагувати слабше. Це зменшувало непродуктивне споживання енергії.

Аналогова інтерпретація виявилась також суттєво стійкішою до завад. Якщо дискретний сигнал втрачався або спотворювався, реакція була відсутньою. Псевдоаналогова система завдяки використанню функцій належності могла розпізнати спотворений сигнал із певним рівнем упевненості та прийняти відповідне рішення.

На рисунку 5 подано порівняння моделей: зліва показано дискретне поширення сигналів з різкою межею зони активності; справа – аналогова модель з плавним спаданням інтенсивності, яка забезпечує приріднішу й енергоефективнішу колективну поведінку.

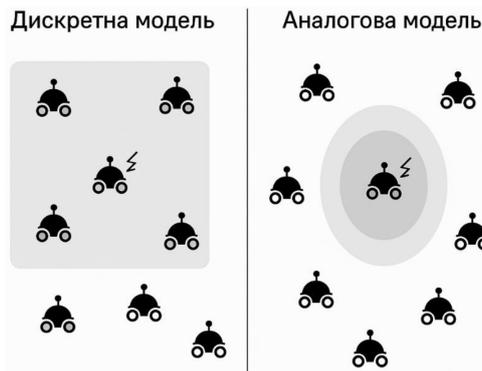


Рис. 5. Порівняння дискретної та аналогової моделі поширення сигналів у рою роботів

Експерименти підтвердили, що системи, побудовані на аналогових сигналах з нечіткою семантикою, забезпечують вищу надійність і адаптивність комунікації в умовах завдань та динамічних змін середовища.

4. Експериментальне дослідження ефективності псевдоаналогової комунікації

З метою забезпечення оптимальних результатів усі серії експерименту були реалізовані за однакових параметрів початкової конфігурації рою роботів:

- кількість роботів-«левів» – 12;
- кількість роботів-«антилоп» – 35.

У таблиці 1 показана реалізація трьох серій експерименту, кожна з яких відрізнялась підходом до моделювання сигналів.

Експеримент проводився у середовищі імітаційного моделювання «Webots» [15] протягом 500 тактів, з подальшою агрегацією результатів за 10 прогонів кожної серії. У таблиці 2 наведено середні результати щодо кількості вцілілих роботів («антилоп») та рівня залишкової енергії в системі.

Таблиця 1

Умови проведення серій експерименту за типом сигналів та характеристиками перешкод

Серія	Тип сигналів	Втрата / спотворення сигналів	Особливість
Серія 1	Дискретні	Відсутні	Базовий контроль (однакова реакція на всі сигнали)
Серія 2	Дискретні	50 % втрат	Імітація перешкод, частина «антилоп» не реагує
Серія 3	Псевдоаналогові (нечіткі)	50 % сигналів – спотворені	Реакція залежить від інтенсивності сигналу

Таблиця 2

Середні результати експерименту для кожної серії (усереднено по 10 запусках)

Стан системи	Серія 1 (базова)	Серія 2 (з втратами)	Серія 3 (нечіткі сигнали)
Кількість «антилоп» після 600 тактів	20 (67 %)	16 (53 %)	20 (67 %)
Загальний запас енергії (що залишився)*	2601 (22 %) найбільше витрачено	3800 (31 %) найменше витрачено	3070 (25 %) – на ~18 % менше за серію 1

* Чим більше залишкової енергії – тим менше її було витрачено в процесі роботи рою.

На рисунку 7 представлена графічне порівняння результатів експерименту.

У першій серії експерименту було досягнуто високого рівня збереження роботів, проте це супроводжувалося значним енергоспоживанням. Причиною цього є те, що всі роботи реагували на сигнали однаково, без урахування їхньої сили або важливості.

У другій серії, в умовах втрат сигналів, кількість врятованих роботів зменшилася, оскільки не всі «антилоп» встигали зреагувати на небезпеку. Водночас енергоспоживання виявилось меншим, адже не кожен робот активувався у відповідь на сигнал.

У третій серії, де застосовувалася нечітка (псевдоаналогова) передача сигналів, спостерігався найкращий баланс. Рівень виживаності залишився таким самим, як у першій серії, але енергоспоживання зменшилося на 18 % завдяки гнучкому реагуванню на сигнали з різною інтенсивністю.

Таким чином, дослідження показало, що використання нечітких сигналів у комунікації між роботами рою роботів дозволяє значно підвищити її ефективність. По-перше, знижується надмірне витрачання енергії, яке виникає при одноманітному реагуванні на будь-який сигнал. По-друге, система краще пристосовується

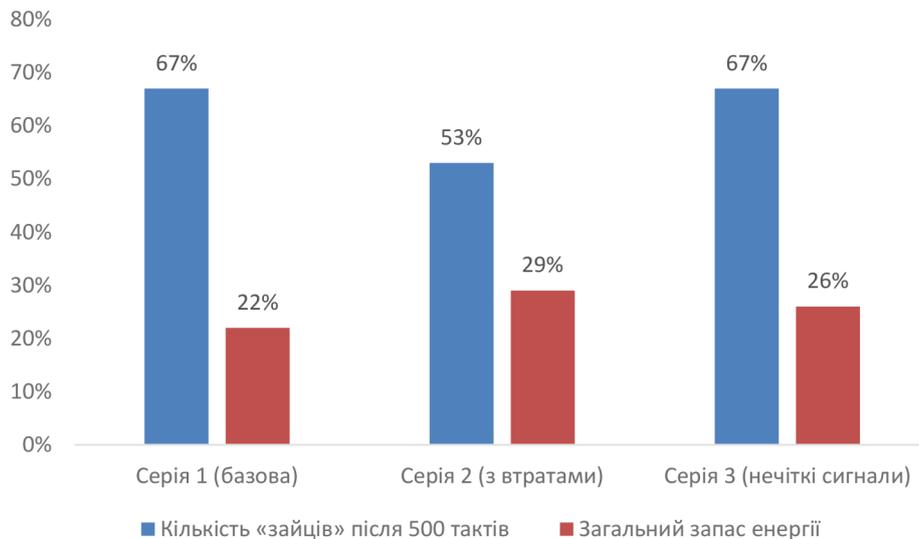


Рис. 7. Порівняння ефективності різних моделей комунікації у роях роботів

до умов із втратами або спотворенням сигналів. По-третє, забезпечується узгоджена та енергоефективна поведінка всієї групи роботів.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує доцільність та ефективність використання нечіткої (псевдоаналогової) комунікації як засобу координації поведінки в багатороботних системах, що діють у складних, зашумлених та динамічних середовищах.

Запропонована модель, натхненна принципами комунікації біологічних систем, використовує варіативні сигнали з лінгвістичною інтерпретацією параметрів, що забезпечує гнучке, адаптивне реагування на зміни в оточенні. Система виявила здатність до варіювання інтенсивності дій залежно від сили, тривалості та частоти сигналів, що сприяє зменшенню енергоспоживання, зокрема до 18 % у порівнянні з традиційними дискретними моделями. Крім того, нечіткий підхід забезпечує стійкість до втрат і спотворень сигналів, зберігаючи релевантність отриманої інформації навіть у шумових умовах.

Локальна природа взаємодії між агентами дозволяє уникнути потреби в глобальному позиціонуванні або централізованому управлінні, що суттєво спрощує реалізацію системи на апаратному рівні. Застосування направлених приймачів для визначення напрямку сигналу забезпечує мінімізацію обчислювальних витрат, що робить запропоновану модель придатною для реалізації на недорогих платформах із обмеженими ресурсами.

Отримані результати свідчать про перспективність розробленого підходу та створюють підґрунтя для подальшого вдосконалення методів комунікації в автономних роботизованих системах.

Список використаних джерел:

1. Brambilla M., Ferrante E., Birattari M., Dorigo M. Swarm Robotics: A Review from the Swarm Engineering Perspective. *Swarm Intelligence*. 2013. Vol. 7, No. 1. P. 1–41. DOI: 10.1007/s11721-012-0075
2. Verma J. K., Ranga V. Multi-Robot Coordination Analysis, Taxonomy, Challenges and Future Scope. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2021. Vol. 102. Article No. 10. DOI: 10.1007/s10846-021-01378-2
3. Rasouli S., Dautenhahn K., Nehaniv C. L. Simulation of a Bio-Inspired Flocking-Based Aggregation Behaviour in Swarm Robotics. *Biomimetics*. 2024. Vol. 9, No. 11. Article No. 668. DOI: 10.3390/biomimetics9110668
4. Ковтунов Ю., Макогон Г., Ісаков О., Бабкін Ю., Калінін І., Лацута Р. Використання математичного апарату нечіткої логіки для фаззифікації та алгоритмізації роботи системи інтерактивного моніторингу транспортних комунікацій. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Т. 4, № 3. С. 64–68. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.064>
5. Kornienko S., Kornienko O. Minimalistic approach towards communication and perception in microrobotic swarms. *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2005. P. 2228–2234. DOI: 10.1109/IROS.2005.1545594
6. Kernbach S. Swarmrobot.org – Open-hardware microrobotic project for large-scale artificial swarms. *arXiv preprint*, 2011. Access mode: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1110.5762>
7. Montanier J., Faigl J. Language evolution in swarm robotics: A perspective. *Frontiers in Robotics and AI*. 2020. Vol. 7. Article No. 12. DOI: 10.3389/frobt.2020.00012
8. Лаврик В., Скідан В., Сукало М., Воливач А., Лебеденко Ю. Використання IoT пристроїв для моніторингу стану рослин в сільському господарстві. *Інформаційні технології та суспільство*. 2025. № 1 (16). С. 116–122. DOI: 10.32689/maup.it.2025.1.15

-
9. Beni G., Wang J. Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems. In: *Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics?* Berlin: Springer, 1989. P. 703–712. DOI: 10.1007/978-3-642-58069-7_38
 10. Moore R. K., Marxer R., Thill S. Vocal interactivity in–and–between humans, animals, and robots. *Frontiers in Robotics and AI*. 2016. Vol. 3. Article No. 61. DOI: 10.3389/frobt.2016.00061
 11. AlHadithi B. M., Pastor C. CostEffective Localization of Mobile Robots Using Ultrasound Beacons and Differential Time-of-Flight Measurement. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 17. Article No. 7597. DOI: 10.3390/app14177597
 12. Goel P., Roumeliotis S. I., Sukhatme G. S. Robust Localization Using Relative and Absolute Position Estimates. *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2003. P. 1065–1071. DOI: 10.1109/IROS.2003.124883
 13. Kernbach S. et al. Towards applied swarm robotics: current limitations and enablers. *Swarm Intelligence*. 2021. Vol. 15, No. 4. P. 223–245. DOI: 10.1007/s11721-021-00189-x
 14. Li Z., Yu Y., Horoshenkov K. V. A comparison of the performance of four acoustic modulation techniques for robot communication in pipes. *The International Journal of Acoustics and Vibration*. 2023. Vol. 28, No. 1. P. 98–116. DOI: 10.20855/ijav.2023.28.11930
 15. Cyberbotics Ltd. Webots: Open-source robot simulator. URL: <https://cyberbotics.com>

References:

1. Brambilla, M., Ferrante, E., Birattari, M., Dorigo, M. (2013). Swarm Robotics: A Review from the Swarm Engineering Perspective. *Swarm Intelligence*. Vol. 7, No. 1. P. 1–41. DOI: 10.1007/s11721-012-0075
2. Verma, J. K., Ranga, V. (2021). Multi-Robot Coordination Analysis, Taxonomy, Challenges and Future Scope. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. Vol. 102. Article No. 10. DOI: 10.1007/s10846-021-01378-2
3. Rasouli, S., Dautenhahn, K., Nehaniv, C. L. (2024). Simulation of a Bio-Inspired Flocking-Based Aggregation Behaviour in Swarm Robotics. *Biomimetics*. Vol. 9, No. 11. Article No. 668. DOI: 10.3390/biomimetics9110668
4. Kovtunov, Yu., Makohon, H., Isakov, O., Babkin, Yu., Kalinin, I., Latsuta, R. (2020). Vykorystannia matematychnoho aparatu nechitkoi lohiky dlia fazzyfikatsii ta alhorytmizatsii roboty systemy interaktyvnoho monitorynhu transportnykh komunikatsii. *Suchasni informatsiini systemy*. T. 4, № 3. S. 64–68. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.064>
5. Kornienko, S., Kornienko, O. (2005). Minimalistic approach towards communication and perception in microrobotic swarms. *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. P. 2228–2234. DOI: 10.1109/IROS.2005.1545594
6. Kernbach, S. (2011). Swarmrobot.org – Open-hardware microrobotic project for large-scale artificial swarms. *arXiv preprint*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1110.5762>
7. Montanier, J., Faigl, J. (2020). Language evolution in swarm robotics: A perspective. *Frontiers in Robotics and AI*. Vol. 7. Article No. 12. DOI: 10.3389/frobt.2020.00012
8. Lavrik, V., Skidan, V., Sukalo, M., Volivach, A., Lebedenko, Yu. (2025). Vykorystannia IoT prystroiv dlia monitorynhu stanu roslyn v silskomu hospodarstvi [Using IoT devices to monitor plant health in agriculture]. *Informatsiini tekhnologii ta suspilstvo*. № 1 (16). S. 116–122. DOI: 10.32689/maup.it.2025.1.15
9. Beni, G., Wang, J. (1989). Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems. In: *Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics?* Berlin: Springer, P. 703–712. DOI: 10.1007/978-3-642-58069-7_38
10. Moore, R. K., Marxer, R., Thill, S. (2016). Vocal interactivity in–and–between humans, animals, and robots. *Frontiers in Robotics and AI*. Vol. 3. Article No. 61. DOI: 10.3389/frobt.2016.00061
11. AlHadithi, B. M., Pastor, C. (2024). CostEffective Localization of Mobile Robots Using Ultrasound Beacons and Differential Time-of-Flight Measurement. *Applied Sciences*. Vol. 14, No. 17. Article No. 7597. DOI: 10.3390/app14177597
12. Goel, P., Roumeliotis, S. I., Sukhatme, G. S. (2003). Robust Localization Using Relative and Absolute Position Estimates. *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. P. 1065–1071. DOI: 10.1109/IROS.2003.124883
13. Kernbach, S. et al. (2021). Towards applied swarm robotics: current limitations and enablers. *Swarm Intelligence*. Vol. 15, No. 4. P. 223–245. DOI: 10.1007/s11721-021-00189-x
14. Li, Z., Yu, Y., Horoshenkov, K. V. (2023). A comparison of the performance of four acoustic modulation techniques for robot communication in pipes. *The International Journal of Acoustics and Vibration*. Vol. 28, No. 1. P. 98–116. DOI: 10.20855/ijav.2023.28.11930
15. Cyberbotics Ltd. Webots: Open-source robot simulator. [Electronic resource]. – Retrieved from: <https://cyberbotics.com>.

Дата першого надходження статті до видання: 24.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

Марчук А. Р., кандидат технічних наук,
доцент кафедри математики та інформаційних технологій
Університету економіки і підприємництва
ORCID: 0000-0002-3726-2878

Ярецька Н. О., кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри математики та інформаційних технологій
Університету економіки і підприємництва
ORCID: 0000-0002-3726-2878

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ЛІНІЙНОЇ АЛГЕБРИ ЯК ІНСТРУМЕНТУ ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ: ДОСВІД УПРОВАДЖЕННЯ GEOGEBRA У ОСВІТУ МАЙБУТНІХ ІНЖЕНЕРІВ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

У сучасній технічній освіті динамічні комп'ютерні середовища відіграють ключову роль у поєднанні теоретичних математичних моделей з їх практичним застосуванням. В статті показано досвід системного використання середовища GeoGebra при викладанні розділу «Лінійна алгебра та аналітична геометрія» дисципліни «Вища та прикладна математика» майбутнім інженерам програмного забезпечення. На основі огляду наукових джерел та проведеного експерименту доведено, що візуалізація абстрактних понять лінійної алгебри та аналітичної геометрії істотно підсилює розуміння матеріалу здобувачами вищої освіти вказаної спеціальності. Описано підхід, який застосовується у нашому закладі – Університеті економіки і підприємництва – де GeoGebra інтегроване для проведення практичних занять та самостійної роботи здобувачів вищої та перед вищої освіти.

Було проведено навчальний експеримент із двома групами: експериментальна (група з 8 студентів) – працювала з GeoGebra-аплетами, контрольна (група з 12 студентів) – працювала за класичною методикою подання матеріалу дисципліни. Порівняльний аналіз результатів тестування і анкетування доводить, що здобувачі вищої освіти з експериментальної групи не лише покращили свої результати та знання, а й продемонстрували глибше розуміння геометричної інтерпретації векторних операцій, матричних перетворень та розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Візуальна інтерпретація та приклади сприяли формуванню інстинктивного бачення структури лінійних моделей, що використовуються в інженерії програмного забезпечення.

Отримані результати експерименту підтверджують високу ефективність динамічного комп'ютерного середовища GeoGebra як інструмента швидкої та наочної демонстрації, що значно підвищує рівень мотивації студентів технічних спеціальностей. Використання GeoGebra дозволяє здобувачам вищої освіти не просто бачити результат, а інтерактивно досліджувати його, змінюючи параметри моделі.

У статті також представлені практичні рекомендації щодо подальшого масштабування підходу використання GeoGebra – від створення авторських аплетів до впровадження проектно-орієнтованих завдань.

Ключові слова: GeoGebra, лінійна алгебра, вища та прикладна математика, технічна освіта, динамічна візуалізація, цифрові інструменти, інженерія програмного забезпечення.

Marchuk A. R., Yaretska N. O. Visualization of linear algebra as a tool of applied mathematics: experience of implementing geogebra in the education of future software engineers

In modern technical education, dynamic computer environments play a key role in combining theoretical mathematical models with their practical application. The article shows the experience of systematic use of the GeoGebra environment in teaching the section "Linear Algebra and Analytical Geometry" of the discipline "Higher and Applied Mathematics" to future software engineers. Based on a review of scientific sources and an experiment, it is proven that visualization of abstract concepts of linear algebra and analytical geometry significantly enhances the understanding of the material by higher education students of the specified specialty. The approach used in our institution – the University of Economics and Entrepreneurship – where GeoGebra is integrated for conducting practical classes and independent work of higher and pre-higher education students is described.

An educational experiment was conducted with two groups: experimental (group of 8 students) – worked with GeoGebra applets, control (group of 12 students) – worked according to the classical method of presenting the material of the discipline. A comparative analysis of the results of testing and questionnaires proves that higher education students from the experimental group not only improved their results and knowledge, but also demonstrated a deeper understanding of the geometric interpretation of vector operations, matrix transformations, and solving systems of linear algebraic equations. Visual interpretation and examples contributed to the formation of an instinctive vision of the structure of linear models used in software engineering.



The obtained experimental results confirm the high efficiency of the dynamic computer environment GeoGebra as a tool for quick and visual demonstration, which significantly increases the level of motivation of students of technical specialties. Using GeoGebra allows higher education students not only to see the result, but also to explore it interactively by changing the parameters of the model.

The article also presents practical recommendations for further scaling the approach to using GeoGebra – from creating author's applets to implementing project-oriented tasks.

Key words: GeoGebra, linear algebra, higher and applied mathematics, technical education, dynamic visualization, digital tools, software engineering.

Постановка проблеми. Підготовка інженерних кадрів в сучасному світі вимагає не лише ґрунтовних теоретичних знань, а й здатності працювати з абстрактними математичними структурами. Одним із найбільш проблемних курсів для студентів залишається лінійна алгебра та аналітична геометрія – її теорії часто сприймаються як відірвані від реальності. Для студентів часто залишається незрозумілим зміст її основних понять, зокрема векторів, матриць і систем лінійних алгебраїчних рівнянь [1–4]. Причиною є суттєвий розрив між алгебраїчною формою викладу та геометричним змістом математичних об'єктів.

Використання інтерактивних математичних середовищ, таких як GeoGebra, дозволяє істотно скоротити цю дистанцію і показати наочно ці поняття [1–8]. Саме візуальні моделі роблять абстрактні елементи – вектори, системи рівнянь, матриці, перетворення – наочно зрозумілими, що сприяє швидкому засвоєнню матеріалу і покращує інтерес до дисципліни [1–3]. Попередні українські та міжнародні дослідження [1, 3, 4, 9] демонструють позитивний вплив таких засобів на якість засвоєння матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У більшості сучасних науково-методичних праць наголошується, що GeoGebra [8] ефективно підтримує навчання лінійної алгебри та аналітичної геометрії завдяки здатності динамічно відображати математичні об'єкти. У роботі [2] показано, що адаптовані аплети GeoGebra дозволяють будувати та досліджувати просторові й плоскі криві, а також виконувати дії над матрицями, включно з пошуком обернених матриць [8], хоча для продуктивної роботи потрібні цифрова грамотність та стабільний інтернет в користувачів.

Аналіз зарубіжних досліджень, таких як [8, 7], засвідчують суттєве статистичне зростання успішності студентів, які працювали з графічними моделями. У праці [8] відзначено, що студенти «захоплено сприйняли геометричні представлення» і що статистичний аналіз підтвердив покращення їхніх результатів після впровадження GeoGebra [9].

В українських працях останніх років [1–4, 9], зокрема у [9], було встановлено «позитивну динаміку результатів вивчення студентами» курсу лінійної алгебри та аналітичної геометрії при використанні комп'ютерних програм таких як MS Excel, MathCAD, Matlab і GeoGebra та інших [3, 9]. Було відзначено, що візуалізація абстрактних теорій цією системою прискорює розв'язання задач і підвищує інтерес до дисципліни [9]. Аналогічно, інші дослідники підкреслюють [1, 3, 8], що навчальні програми на базі GeoGebra активізують дослідницьку і творчу діяльність студентів, сприяють інтеграції різних видів навчальної активності (навчальної, пошукової, проектної) і дозволяють адаптувати виклад під індивідуальний рівень студентів. Зокрема, у дослідженні [1] виділено, що викладання математики на основі середовища GeoGebra «сприяє підвищенню якості підготовки... застосуванню активних прийомів та методів, зростанню творчої активності студентів» [1].

Таким чином, наукова спільнота практично одноставно підтверджує високу ефективність цифрових середовищ для розуміння абстрактних понять і теорій лінійної алгебри.

Мета статті. Метою проведення дослідження є:

- 1) аналіз можливостей та доцільність використання середовища GeoGebra у візуалізації об'єктів лінійної алгебри та аналітичної геометрії для покращення знань студентів технічних спеціальностей;
- 2) оцінити ефективність інтеграції інструмента GeoGebra у навчальний процес за результатами навчання;
- 3) провести загальний огляд літератури щодо використання GeoGebra у математичній освіті;
- 4) показати впровадження GeoGebra у практичні заняття Університету економіки і підприємництва на прикладі курсу «Вища та прикладна математика»;
- 5) описати й проінтерпретувати результати навчального експерименту;
- 6) навести приклади конкретних GeoGebra-конструкцій;
- 7) сформулювати висновки та практичні рекомендації для викладачів ЗВО та коледжів.

Методика впровадження GeoGebra у Хмельницькому університеті економіки і підприємництва.

В університеті економіки і підприємництва середовище GeoGebra інтегровано у практичні заняття з курсу «Вища та прикладна математика». Методика включає:

- попередню підготовку аплетів, які відповідають кожному завданню заняття;
- самостійну роботу студентів на занятті – побудова моделей, перевірка алгебраїчних обчислень за допомогою графічних інструментів;
- обговорення результатів у групах, що сприяє розвиткові математичного мислення та рефлексії.

Теми обраних аплетів охоплюють, зокрема, наступні завдання:

- Побудова двох ліній та аналіз кількості розв'язків системи.
- Побудова площин з подальшим аналізом.
- Побудова кривих і поверхонь другого порядку з можливими змінами їх параметрів.
- Візуалізація векторів і лінійних комбінацій у 3D.
- Демонстрація впливу матричного перетворення на базисні вектори.

Такий підхід дозволяє студентам не просто бачити результат, а інтерактивно досліджувати його, змінюючи параметри моделі.

Навчальний експеримент та його результати. Для оцінювання ефективності методики проведено експеримент із двома групами:

– Експериментальна група ($N = 8$ студентів першого курсу спеціальності «Інженерія програмного забезпечення») – навчалася з використанням GeoGebra на практичних заняттях з дисципліни «Вища та прикладна математика»;

– Контрольна група ($N = 12$) – працювала за традиційною схемою (вправи з підручників і лекційні пояснення).

При цьому обидві групи прослухали один і той самий лекційний курс.

Порівняння результатів тестування в кінці семестру показало, що:

- експериментальна група підвищила результат із 62 % до 74 % (приріст 12 %);
- контрольна показала приріст лише на 6 % (61 % → 67 %).

Анкетування здобувачів освіти засвідчило, що:

– 85 % студентів експериментальної групи відзначили GeoGebra як «ключовий інструмент для розуміння»,

– 90 % – як «фактор підвищення інтересу до предмета».

Графічні моделі (рис. 1–4) допомогли студентам: інтуїтивно осмислити перетини ліній; дослідити системи рівнянь різної природи; аналізувати поведінку кривих другого порядку; розвинути просторову уяву.

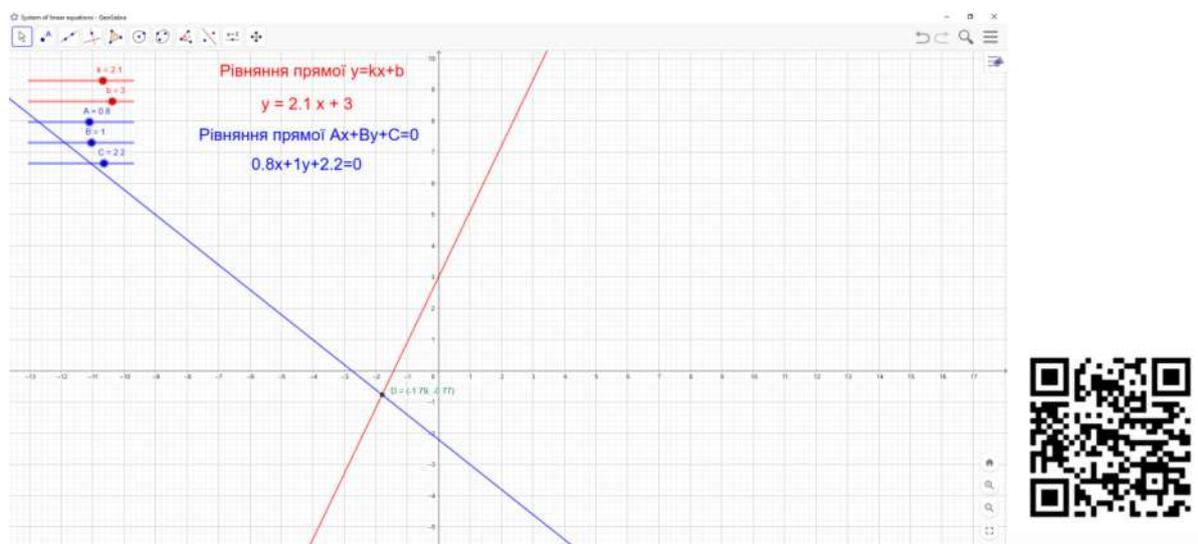


Рис. 1. Графічне рішення системи двох лінійних рівнянь в GeoGebra: дві прямі перетинаються у точці, що є розв'язком системи

<https://www.geogebra.org/classic/yuepeuqn>

Під час виконання завдань з системами рівнянь студенти отримували готові геометричні побудови в GeoGebra. Наприклад, на рис. 1 показано типове завдання: побудовано графіки двох ліній (синя і червона) і знайдено їх точку перетину (зелена крапка). Студенти відкрито висловлювали, що такого роду наочність допомагає їм візуально впевнитися в правильності алгебраїчних обчислень. Цей експеримент підтверджується висновками зробленими в [1] про те, що такий підхід «позитивно позначається на успішності студентів» і викликає «пізнавальний інтерес до точних наук» [1].

GeoGebra дозволяє також моделювати зображення системи трьох лінійних рівнянь. На рис. 2 зображено випадок, коли система рівнянь складається з цих трьох рівнянь. Використовуючи програму ми можемо коригувати положення повзунків, які задають коефіцієнти в системах рівнянь. При цьому ми одразу бачимо розв'язок у вигляді координат точки, що дає можливість перевірити свої розрахунки, зроблені методами лінійної алгебри. Студенти відзначають, що лише графічне подання таких задач допомагає їм зорієнтуватися у розв'язках і уникнути арифметичних помилок.

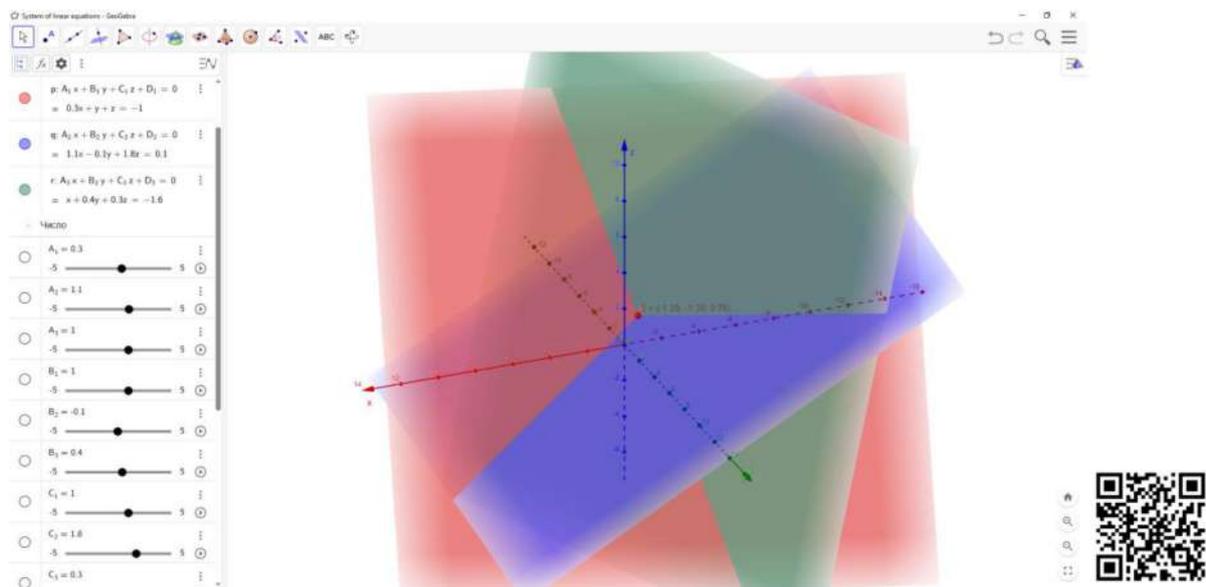


Рис. 2. Графічне рішення системи трьох лінійних рівнянь в GeoGebra: візуалізація в 3D за допомогою площин <https://www.geogebra.org/classic/xgygepyx>

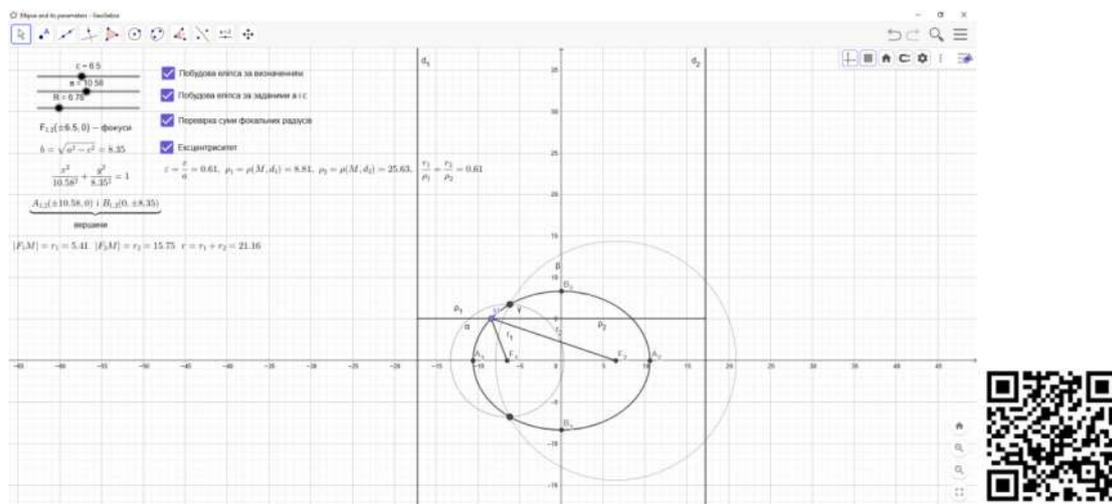


Рис. 3. Дослідження еліпса в залежності від його параметрів в GeoGebra <https://www.geogebra.org/classic/qyubujgv>

На рис. 3 показано одну з типових кривих аналітичної геометрії – еліпс. Завдяки цій розробці ми можемо коригувати положення повзунків, які задають різні параметри еліпса. Також ми можемо перевірити усі наші розрахунки наочно з отриманого рисунка. Така динамічна модель допомагає студентам глибше зрозуміти властивості кривих другого порядку, які вивчаються в курсі вищої та прикладної математики.

На рис. 4 показано розв’язок нетипової задачі аналітичної геометрії, а саме перетину еліпсоїда і прямої. Змінюючи параметри еліпса і прямої ми одразу ж можемо спостерігати їх графічне відображення, а точки показують їх перетин. Крім того ми одразу бачимо результат обчислення відстані між цими точками, що допомагає підтвердити числові розрахунки виконані студентами. Зокрема, для того, щоб зобразити ці дослідження за допомогою класичних методів, немає можливості, а GeoGebra дозволяє це зробити з можливістю демонстрації кожному студенту на його смартфоні.

Висновки. Результати дослідження свідчать, що використання середовища GeoGebra у викладанні вищої та прикладної математики має чітко виражений позитивний ефект.

А інтерактивна візуалізація:

- підсилює розуміння алгебраїчних операцій;
- допомагає студентам побачити геометричний сенс моделей;
- стимулює інтерес і формує дослідницькі навички.

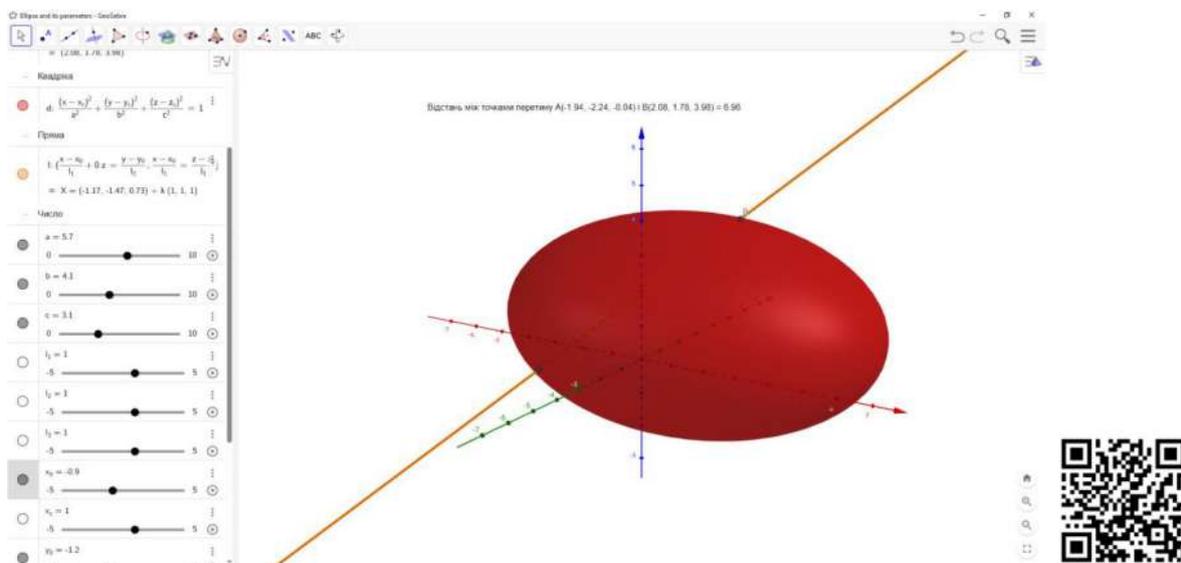


Рис. 4. Графічне розв'язання системи рівнянь перетину еліпсоїда і прямої

<https://www.geogebra.org/classic/kefczwar>

На основі отриманих результатів рекомендуємо наступні напрями подальшого впровадження:

1. Розробка власних наборів GeoGebra-аплетів для специфічних тем університетів і коледжів, що дозволить врахувати потреби програми та створити адаптивні вправи.
2. Використання GeoGebra для групових проектів: наприклад, студенти можуть спільно моделювати прикладні задачі (проекування оптичних систем, 3D-моделювання силових полів тощо) з використанням тем вищої та прикладної математики.
3. Інтеграція результатів експерименту у систему дистанційного навчання університету, щоб студенти мали постійний доступ до інструментів GeoGebra як під час аудиторних, так і самостійних занять.
4. Підготовка посібника або електронного підручника з вищої та прикладної математики з використанням GeoGebra, який міститиме приклади побудов, завдання й методичні рекомендації для викладачів. GeoGebra має потенціал стати основою сучасної методики викладання вищої та прикладної математики та важливим елементом підготовки майбутніх інженерів.

Список використаних джерел:

1. Гусак Л. П., Радзіховська Л. М., Гринчук Т. П. Використання середовища GeoGebra в математичній підготовці студентів економічних спеціальностей. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методи навчання*. 2023. Вип. 70. С. 24–29.
2. Дубовик В., Рудницький С. Візуалізація навчального матеріалу у процесі підготовки майбутніх учителів математики засобами середовища GeoGebra. *Фізико-математична освіта*. 2022. Т. 34, № 2. С. 33–40.
3. Ярецька Н. О., Рамський А. О., Поплавська О. А. Особливості викладання вищої математики студентам галузі знань «Інформаційні технології» в умовах цифровізації освіти». *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75) № 3. С. 457–463. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.2/60>
4. Потапова О. М., Олексенко В. М., Петрина Я. Д. Сучасні підходи до викладання математичних дисциплін у вищій школі. *Інноваційна педагогіка*. 2025. Вип. 79, Т. 2. С. 154–160. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-6085/2025/79.2.30>
5. Геревенко А. М., Ільїна Т. В., Ібрагімова Л. А. Використання цифрових платформ для підвищення якості професійної освіти. *Академічні візії*. 2024. № 31. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11442893>
6. Чорна І., Мельничук Л., Татарин О. Використання інтерактивних технологій в освітньому процесі під час викладання природничо-математичних дисциплін. *Молодий Вчений*. 2022. № 6(106). С. 61–64. URL: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2022-6-106-13>
7. Bobro N. The use of artificial intelligence in the organization of the educational process in a digital educational environment. *Social Science and Humanities Journal*. 2024. № 08 (02). P:34586-34589. DOI: 10.18535/sshj.v8i03.945
8. Havelková V. Geogebra in teaching linear algebra. *Proceedings of the European Conference on E-Learning (ECEL)*. 2013. P. 581–589.
9. Гусак Л. П., Радзіховська Л. М. Використання комп'ютерних програм під час викладання курсу «Лінійна алгебра та аналітична геометрія». *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2024. Вип. 56. С. 149–156.

References:

1. Husak, L. P., Radzikhovska, L. M., Hrynychuk, T. P. (2023). Vykorystannia seredovyshcha GeoGebra v matematychnii pidhotovtsi studentiv ekonomichnykh spetsialnosti [Using the GeoGebra environment in mathematical training of students of economic specialties]. *Suchasni informatsiini tekhnologii ta innovatsiini metodyky navchannia*. Vyp. 70. S. 24–29. [in Ukrainian].
2. Dubovyk, V., Rudnytskyi, S. (2022). Vizualizatsiia navchalnoho materialu u protsesi pidhotovky maibutnikh uchyteliv matematyky zasobamy seredovyshcha GeoGebra [Visualization of educational material in the process of training future mathematics teachers using the GeoGebra environment]. *Fyzyko-matematychna osvita*. T. 34, № 2. S. 33–40. [in Ukrainian].
3. Yaretska, N. O., Ramskyi, A. O., Poplavska, O. A. (2025). Osoblyvosti vykladannia vyshchoi matematyky studentam haluzi znan “Informatsiini tekhnologii” v umovakh tsyfrovizatsii osvity” [Peculiarities of teaching higher mathematics to students of the field of knowledge “Information Technologies” in the conditions of digitalization of education”]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: Tekhnichni nauky*. T. 36 (75) № 3. S. 457–463. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.2/60> [in Ukrainian].
4. Potapova, O. M., Oleksenko, V. M., Petryna, Ya. D. (2025). Suchasni pidkhody do vykladannia matematychnykh dystsyplin u vyshchii shkoli [Modern approaches to teaching mathematical disciplines in higher education]. *Innovatsiinapedahohika*. Vyp. 79, T. 2. S. 154–160. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-6085/2025/79.2.30> [in Ukrainian].
5. Herevenko, A. M., Ilina, T. V., Ibrahimova, L. A. (2024). Vykorystannia tsyfrovyykh platform dlia pidvyshchennia yakosti profesiinoi osvity [Using digital platforms to improve the quality of vocational education]. *Akademichni vizii*. № 31. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11442893> [in Ukrainian].
6. Chorna, I., Melnychuk, L., Tataryn, O. (2022). Vykorystannia interaktyvnykh tekhnologii v osvitnomu protsesi pid chas vykladannia pryrodnycho-matematychnykh dystsyplin [The use of interactive technologies in the educational process when teaching natural and mathematical disciplines]. *Molodyi Vchenyi*. № 6(106). S. 61–64. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2022-6-106-13> [in Ukrainian].
7. Bobro, N. (2024). The use of artificial intelligence in the organization of the educational process in a digital educational environment. *Social Science and Humanities Journal*. № 08 (02). P. 34586–34589. DOI: 10.18535/sshj.v8i03.945
8. Havelková, V. (2013). Geogebra in teaching linear algebra. *Proceedings of the European Conference on E-Learning (ECEL)*. P. 581–589.
9. Husak, L. P., Radzikhovska, L. M. (2024). Vykorystannia kompiuternykh prohram pid chas vykladannia kursu “Liniina alhebra ta analitychna heometriia”. [Using computer programs when teaching the course “Linear Algebra and Analytic Geometry”]. *Kompiuterno-intehrovani tekhnologii: osvita, nauka, vyrobnytstvo*. Vyp. 56. S. 149–156. [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 24.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

Pasichnyk V. A., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Principal Developer of Software Engineering and Digital Transformation Company Luxoft
ORCID: 0000-0001-9434-563X

Pasichnyk A. N., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor at the Department of Mathematical Modelling and System Analysis Dniprosky State Technical University
ORCID: 0000-0002-8561-1374

Riabenko. V. I., Higher Education Applicant at the Department of Mathematical Modelling and System Analysis Dniprosky State Technical University
ORCID: 0009-0004-8723-8819

MATHEMATICAL MODELS AND ALGORITHMS OF CRYPTOGRAPHIC DATA PROTECTION IN DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEMS

In modern conditions, information networks and data processing and transmission centers are a determining factor in the effective functioning of management systems of state institutions, financial and industrial organizations, energy and communications enterprises, transport and logistics infrastructure. Accordingly, the increase in the number of such centers and the number of different communication lines between them significantly increases the risks of unauthorized access to confidential information, ensuring data security and integrity. Therefore, the study of the problem of information security is of great importance for preventing and countering phishing attacks, which are constantly exposed to both individual enterprise networks and national networks.

The paper analyzes mathematical models that describe the process of information protection using cryptographic data encryption algorithms. The practical application of the algorithms of the given substitution, the Vigenère cipher, and self-synchronizing stream ciphers is considered. To increase the stability of the ciphertext, a modification of the Vigenère algorithm is proposed using separate unified alphabet tables for the text and the encryption/decryption key. Recommendations are developed for the use of the considered crypto algorithms to ensure effective protection of information systems from intentional or accidental interference. To increase the efficiency of the use of crypto algorithms, the feasibility of the integrated use of symmetric and asymmetric encryption methods to use their positive qualities, such as the speed of processing secret keys and the security of their transmission, is indicated. Promising directions for the development of information security systems using cryptographic algorithms are identified.

Key words: information systems, crypto algorithms; data encryption; authentication; access control.

Пасічник В. А., Пасічник А. М., Рябенко В. І. Математичні моделі та алгоритми криптографічного захисту даних в розподілених інформаційних системах

В сучасних умовах інформаційні мережі та центри обробки і передачі даних є визначальним фактором ефективного функціонування систем управління державними інституціями, фінансовими і промисловими організаціями, підприємствами енергетичного сектору і зв'язку, транспортною та логістичною інфраструктурою. Відповідно збільшення чисельності таких центрів і кількості різних ліній зв'язку між ними значно підвищує ризики несанкціонованого доступу до конфіденційної інформації, забезпечення безпеки та цілісності даних. Тому дослідження проблеми інформаційної безпеки має важливе значення для упередження та протидії фішинговим атакам, яким постійно піддаються як окремі мережі підприємств, так і національні мережі в цілому.

У роботі проведено аналіз математичних моделей, які описують процес захисту інформації за допомогою криптографічних алгоритмів шифрування даних. Розглянуто питання практичного застосування алгоритмів заданої підстановки, шифру Віженера та потокових шифрів, що самосинхронізуються. Для підвищення стійкості шифротексту запропоновано модифікацію алгоритму Віженера з використанням окремих уніфікованих таблиць алфавітів для тексту і ключа шифрування/дешифрування.

Розроблено рекомендації щодо застосування розглянутих криптоалгоритмів для забезпечення ефективного захисту інформаційних систем від навмисного чи випадкового втручання. Для підвищення ефективності застосування криптоалгоритмів вказано на доцільність комплексного застосування методів симетричного і асиметричного



шифрування для використання їх позитивних якостей, таких як швидкість обробки секретних ключів та безпеки їх передачі. Визначені перспективні напрями розвитку систем інформаційної безпеки з використанням криптографічних алгоритмів.

Ключові слова: інформаційні системи, криптоалгоритми; шифрування даних; автентифікація; управління доступом.

Formulation of the problem. The use of information and communication technologies is one of the most important levers of economic development of society. In modern conditions, information networks implement the processing and transmission of large volumes of data that ensure the management of state institutions, financial and industrial organizations, energy sector enterprises, transport and logistics infrastructure, special-purpose control and communication systems. According to expert estimates, the total volume of data processed and transmitted in computer networks increases almost an order of magnitude annually. The effectiveness of the functioning of such information systems involves the use of a distributed architecture that combines a large number of computer centers located at a considerable distance. Accordingly, the increase in the number of such centers and the number of different communication lines between them significantly increases the risks of unauthorized access to confidential information, ensuring data security and integrity [1, 2]. Therefore, the issues of protecting computer networks and systems from unauthorized access in modern conditions have become particularly important, and the problems of improving and determining the effectiveness of information protection methods are quite relevant and require further development.

Analysis of recent research and publications. Currently, one of the most effective approaches to data protection in information systems is cryptographic methods that are based on the properties of the information itself and do not use the properties of its material carriers, the features of computer centers for its processing, transmission and storage technologies. Therefore, various aspects of the study of the problems of the development of cryptology and cryptographic analysis are actively investigated in numerous scientific works.

Thus, the conceptual principles of information security, national interests in the information sphere, the strategy for the development and formation of a single information space, threats to the security of the state and its citizens in the information sphere, the system for ensuring information security in Ukraine, the features of the functioning and functions of its subjects are systematized in the textbook [1]. The work [2] presents the results of the unification of practical approaches and standards, which are proven and agreed methods for implementing cybersecurity for a wide range of technical developments in the field of computerized systems, information networks and computer architecture.

The article [3] considers the problem of increasing the security of Web resources with stable cryptographic algorithms based on random number generators that take into account the features of user behavior in distributed information systems of collective access. During the study, a random number generation algorithm was developed that uses pre-prepared tables containing verified irrelevant numbers. An algorithm for the operation of a table generator for the software implementation of an encryption system was proposed.

The work [4] is devoted to the problems of information protection at critical infrastructure facilities. It is shown that in order to ensure the reliability of the functioning and protection of such facilities from cyber threats, it is necessary to ensure the implementation of the latest strategies and approaches in this area using innovative technologies of artificial intelligence, cryptography, machine learning, blockchain, and others.

The results of the analysis of the problems of developing an information security system and protecting information systems from intentional or accidental interference are given in the publication [5]. Directions for improving information security technologies are determined, taking into account real and potential threats, as well as the basic principles of its provision.

In [6], a methodology for identifying information security violations of a cyber-physical system of a wind generator is presented, taking into account the analysis of statistical indicators of dispersion, asymmetry and kurtosis of the input parameter “power” collected by the system sensors. An algorithm for formalizing the process of identifying falsified data in the information flow of a cyber-physical system and detecting information security violations using methods for analyzing the corresponding statistical indicators is proposed.

In [7], several cryptographic algorithms were proposed to implement access to authorization centers – the Diffie–Hellman key exchange protocol, the DSA algorithm for creating a digital signature of data required for the above protocol, as well as the AES algorithm with different encryption modes for authentication and symmetric data encryption. It is shown that this choice of protocols is explained by the mutual compensation of the problematic areas of these protocols. Thus, the AES algorithm uses an encryption key that is the same for two recipients, since it is used both for encryption and decryption of data. Accordingly, to prevent unauthorized access, a protocol for creating a shared key with the recipient is used, the authentication of which is provided by the DSA algorithm.

The possibilities of using technical systems of interconnected computing devices, mechanical and digital machines (IoT) for data protection of information and telecommunication networks are analyzed in the article [8]. The limitation of the power cycle, memory and data processing of such systems is shown, which complicates the implementation of reliable network security. Based on the analysis of known encryption algorithms: RSA,

Vernam cipher, El-Gamal scheme, a prototype of the IoT system was presented using limited devices and a software implementation of the Vernam cipher, which ensured its high cryptographic stability.

In the work [9], a study of models and algorithms of information security systems of corporate telecommunication networks was conducted. According to the results of the analysis, the identified problematic issues of protecting such networks are related to the need to improve the guest Wi-Fi system connection models and password manager operation algorithms that allow implementing a secure architecture through additional user authentication with its audit within the corporate network perimeter, while protecting credentials from external influence and implementing the “Zero Trust” principle (“never trust, always verify”).

The purpose of the article. The purpose of this article is to study mathematical models of complex protection and ensuring the security and reliability of data transmission in computer systems and networks using algorithms of given substitution, Vigenère cipher and self-synchronizing stream ciphers. Identification and justification of promising directions for improving methods of cryptographic encryption and information protection.

Presenting main material. At this stage, the main features of the development of information technologies can be characterized as follows:

- access to certain data allows you to control significant material and financial values, and the value of information began to increase rapidly;
- continuous growth in volumes and a wide range of computer processing of information, which is no longer limited to text data;
- the complexity of the nature of information interactions poses new tasks for cryptography, such as signing an electronic document and delivering an electronic document “against receipt”;
- the subjects of information processes are now not only people, but also the software systems they create;
- the power of modern computers provides new opportunities for both cipher developers and analysts to break these ciphers.

The above conditions have given new impetus to the development of practical cryptography on mathematical methods for ensuring the confidentiality, integrity and authenticity of information in the following areas:

- firstly, stable ciphers with secret symmetric and asymmetric keys have been developed, designed to perform the classic task of ensuring the secrecy and integrity of transmitted or stored data;
- secondly, methods have been created for solving new, non-traditional problems in the field of information protection, the most famous of which are the problems of signing a digital document and open key distribution.

It should be noted that data can be encrypted both during storage and during transmission using:

- with symmetric encryption, only one key, and everyone uses the same secret key;
- with asymmetric encryption of several keys: one “public key” for encryption, and another “private key” for decryption.

To effectively protect different types of data, it is advisable to use different types of crypto algorithms. A crypto algorithm is an algorithm for implementing a mathematical model of data transformation (encryption) and key generation to ensure access only to authorized users. The use of effective encryption algorithms and secure keys is important for protecting information and preventing unauthorized access to it by attackers. A cryptographic protocol defines a set of cryptographic schemes for data transformation, rules and procedures for key management, including their development and distribution. A cryptographic transformation with a known key k can be represented by the transformation function F , which is defined as follows:

$$y = F(x, k) + x, \quad (1)$$

where x – elements of the original text; k – encryption key; y – elements of the cryptogram.

Let's consider modifications of well-known algorithms: simple substitution, Vigenère cipher, Playfair cipher, and the stream encryption algorithm. We will also consider an algorithm that allows you to encrypt and decrypt data using the proposed crypto algorithms using different data tables.

Simple substitution cipher. This is the simplest encryption method, also called monoalphabetic substitution. The key is a permuted alphabet, the letters of which replace the letters of the regular alphabet of the source text. For example, each letter is replaced by the letter that is 3 positions after it: A@D, B@E, etc. Then the text ABC is replaced by DEF. All monoalphabetic substitutions can be represented in the following form:

$$Y = (ax_i + b) \bmod g, \quad (2)$$

where a – some constant decimal coefficient; b – shift coefficient; g – number of letters of the alphabet used ($g = 33$ for the Ukrainian alphabet, $g = 27$ for the Latin alphabet); x_i – code of the i -th character of the plaintext (sequential number in the alphabet); $i = 1, \dots, n$; n – number of letters of the alphabet used.

The main disadvantage of the considered method is that the statistical properties of the plaintext (frequency of letter repetition) are also preserved in the ciphertext.

Vigenère cipher. A Vigenère cipher is a polyalphabetic encryption algorithm that uses a keyword to shift each letter of the plaintext according to a Vigenère table according to the following formula:

$$y_i = (x_i + k_j) \bmod g, \quad (3)$$

where k_j – code of the j -th character of the key, as which a word or phrase of the main alphabet is used.

Let us consider an example of data encryption according to the given model (3), using the encoding of letters of the Ukrainian alphabet, table 1.

Table 1

Encryption algorithm using alphabet letter code

Letter	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Code	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Letter	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
Code	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Letter	S	T	U	V	W	X	Y	Z	gap
Code	19	20	21	22	23	24	25	26	27

We assume that the original plain text TECHNOLOGY and the substitution of the Vigenère cipher are given, table 2.

Table 2

Encryption algorithm using alphabet letter code

T	E	C	H	N	O	L	O	G	Y
A	L	G	R	I	T	M	A	L	G

The results of encryption of the original data given in Table 2 using the Vigenère cipher (3) are presented in table 3.

Table 3

Algorithm for encrypting the original data with a given key

$Y_1 = (20 + 01) \bmod 27 = 21 \Rightarrow U;$	$Y_6 = (15 + 20) \bmod 27 = 08 \Rightarrow H;$
$Y_2 = (05 + 12) \bmod 27 = 17 \Rightarrow Q;$	$Y_7 = (12 + 13) \bmod 27 = 25 \Rightarrow Y;$
$Y_3 = (03 + 07) \bmod 27 = 10 \Rightarrow J;$	$Y_8 = (17 + 01) \bmod 27 = 18 \Rightarrow R;$
$Y_4 = (08 + 18) \bmod 27 = 26 \Rightarrow Z;$	$Y_9 = (07 + 12) \bmod 27 = 19 \Rightarrow S;$
$Y_5 = (14 + 09) \bmod 27 = 23 \Rightarrow W;$	$Y_{10} = (25 + 07) \bmod 27 = 05 \Rightarrow E.$

Thus, the resulting cryptogram of encrypting the source text using the Vigenère algorithm will have the form given in table 4.

Table 4

Ciphertext from a fixed code letter to an alphabet

<i>U</i>	<i>Q</i>	<i>J</i>	<i>Z</i>	<i>W</i>	<i>H</i>	<i>Y</i>	<i>R</i>	<i>S</i>	<i>E</i>
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

It is also possible to use modifications of the Vigenère cipher – Beaufort ciphers, which have the following formulas:

$$y_i = (k_i - x_i) \bmod g, \quad (4)$$

$$y_i = (x_i - k_i) \bmod g. \quad (5)$$

Homophonic replacement of one character in the ciphertext makes it like a few characters in the ciphertext. This method is used to twist statistical power into the text.

To increase the strength of the Vigenère cipher, it is recommended to introduce the following modification of its algorithm:

$$y_{ij} = (x_i + k_j) \min(\bmod g, \bmod q), \quad (6)$$

where x_i – i -th code of the symbol hidden in the text; k_j – code of the j -th symbol of the key, the role of which is matched with letters from the table of keys, which has a size – q .

Stream ciphers. Ciphers of this type have recently become popular due to their high speed. They convert plaintext into ciphertext one bit per operation. The keystream generator, also called a rolling key generator, produces

a stream of bits: $k_1, k_2, k_3, \dots, k_i$. This keystream and the plaintext bitstream $p_1, p_2, p_3, \dots, p_i$ undergo surgery XOR (exclusively or) to produce the ciphertext bitstream:

$$c_i = p_i \wedge k_i. \quad (7)$$

During decryption, an XOR operation is performed on the ciphertext bits and the same key stream to recover the plaintext bits:

$$p_i = c_i \wedge k_i. \quad (8)$$

The security of the system is entirely dependent on the power of the key flow generator. The key stream generator creates a bit stream that is like a drop-in stream but is deterministic and can be created without delay once decrypted, fig. 1. It is necessary to ensure that the closer the output of the generator to the key flow is to the output, then more time will be required for the evil cipher.

For all stream ciphers, keys are verified. The output of the key stream generator is the key function. Now, if you remove the plaintext/ciphertext pair, you can only read messages that are encrypted with the same key. Stream ciphers are especially useful for encrypting continuous streams of communication traffic, such as a channel that connects two computers.

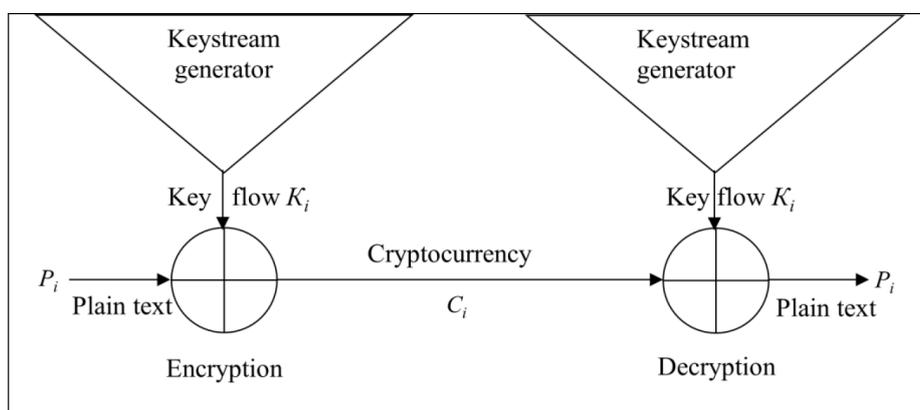


Fig. 1. Algorithm for implementing streaming data encryption

The key flow generator consists of three main parts. The internal mill describes the flow mill of the key flow generator. Two key stream generators with the same key and the same internal host produce the same key streams. The internal output function generates a bit to the key stream. The function of attacking the internal stun generates a new internal stun.

Let's also look at the algorithm for implementing the symmetric stream cipher RC4, which is related to ciphers that are self-synchronizing. This cryptographic algorithm is called a ciphertext autokey. In stream ciphers that are self-synchronizing, the flow of keys is a function of a fixed number of leading bits in the ciphertext, fig. 2.

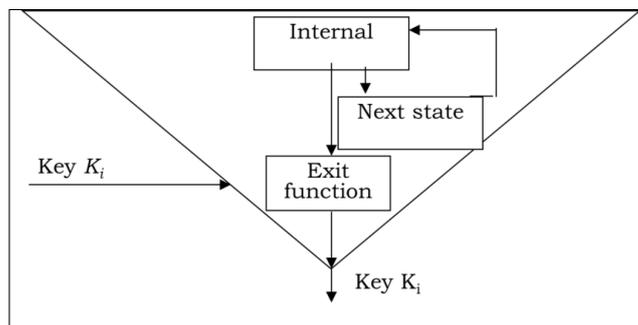


Fig. 2. Algorithm for implementing a key stream generator

A stream cipher that is self-synchronizing is shown in fig. 3. The internal structure is the function of the forward n bits of the ciphertext. It is a cryptographically complex output function that uses the internal machine to generate bits to the key stream.

The fragments of the internal system are entirely contained in the front n symbols of the ciphertext, the decryption generator of the key stream is automatically synchronized with the encryption generator of the key stream that has received the n bits of the ciphertext. In intelligent implementations of this mode, skin notification begins

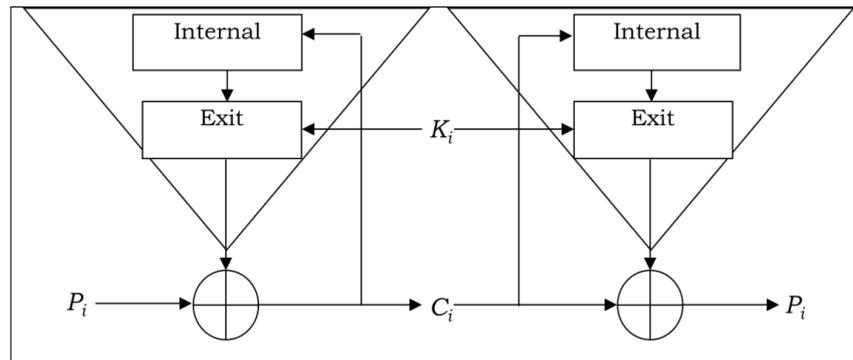


Fig. 3. Schematic of a self-synchronizing key stream generator

with a drop-down heading of up to n bits. This header is encrypted, transmitted and then decrypted. Decryption will be correct after these n bits, as long as the key stream generators are synchronized.

The main advantage of the use of streaming crypto algorithms, which are self-synchronizing, is the speed of their work. The weakness of such algorithms is the widening of the cuts. For each ciphertext bit encoded at the time of transmission, the key stream decryption generator shows n incorrect bits to the key stream. Therefore, each incorrect bit ciphertext is given n replies to the open text until the zipped bits stop flowing into the internal system.

Conclusions. The results of the analysis show that encryption and data protection are important components of information systems protection, ensuring information confidentiality and preserving data integrity in the face of growing cyber threats. The use of modern computer technology and mathematical methods allows to significantly increase the efficiency of the application of models and algorithms of cryptographic data protection.

Modern crypto algorithms provide ample opportunities for modification to dynamically respond to the emergence of new cyber threats when using limited computing resources. Thus, in the work to increase the stability of the ciphertext, a modification of the Vigenère algorithm using separate unified alphabet tables for the text and the encryption key was proposed. It is also necessary to take into account that despite the expediency of separate application of symmetric and asymmetric encryption methods when ensuring certain types of information protection, in information and computing networks it is advisable to use a combination of both approaches for the comprehensive use of their positive qualities, such as the speed of processing secret keys and the security of their transmission.

Bibliography:

1. Остроухов В. В., Присяжнюк М. М., Фармагей О. І., Чеховська М. М. та ін. Інформаційна безпека: підручник. Київ : В-во Ліра. К, 2021. 412 с.
2. Stallings W. Effective Cybersecurity: A Guide to Using Best Practices and Standards. Addison-Wesley, 2019. 800 p.
3. Салієва О., Карпінєць В., Грицак А., Павловський П., Бондаренко І. Підвищення стійкості криптографічних алгоритмів у багатокористувацьких WEB-ресурсах на основі генераторів випадкових чисел, що враховують ентропію поведінки користувача. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2023. В. 1. С. 167–173.
4. Машталяр Я. Русланівна., Козачок В. А., Бржезьська З. М. Богданов О. М. Дослідження розвитку та інновації кіберзахисту на об'єктах критичної інфраструктури. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2023. № 2(22). С. 156–167.
5. Плехова Г. А., Костікова М. В. Актуальні проблеми інформаційної безпеки. *Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці, кібербезпеці та освіті* : мат. Всеукр. наук.-практ. Internet-конф. Харків : ХНАДУ. 2022. С. 68–73.
6. Фурсов І. І., Шматко О. В. Аналіз статистичних показників дисперсії, асиметрії та ексцесу при визначенні порушень інформаційної безпеки кіберфізичних систем вітрових генераторів. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2021, №. 4(100). С. 132–144.
7. Бачинський Р. В., Купецький А. В. Система криптографічного захисту bluetooth зв'язку між пристроєм інтернету речей та мобільним обчислювальним пристроєм. Серія: Інформаційні системи та мережі. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2018. № 887. С. 18–24.
8. Черненко Р. М., Рябчун О. П., Ворохоб М. В., Аносов А. О., Козачок В. А. Підвищення рівня захищеності систем мережі інтернету речей за рахунок шифрування даних на пристроях з обмеженими обчислювальними ресурсами. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2021. № 3(11). С. 124–135.
9. Pasichnyk V., Pasichnyk A. Methods and algorithms for increasing reliability and level security of corporate telecommunications networks. *Математичне моделювання*. К. : ДДТУ. 2025. № 2(53). С. 30–37.

References:

1. Ostroukhov, V. V., Prysiazhniuk, M. M., Farmahei, O. I., Chekhovska, M. M. ta in. (2021). *Informatsiina bezpeka: pidruchnyk* [Information Security: A Textbook]. Kyiv: V-vo Lira. 412 s.
2. Stallings, W. (2019). *Effective Cybersecurity: A Guide to Using Best Practices and Standards*. Addison-Wesley, 800 p.
3. Saliieva, O., Karpinets, V., Hrytsak, A., Pavlovskiy, P., Bondarenko, I. (2023). Pidvyshchennia stiiikosti kryptohrafichnykh alhorytmiv u bahatokorystuvatskykh WEB-resursakh na osnovi heneratoriv vypadkovykh chysel, shcho vrakhovuiut entropiiu povedinky korystuvacha [Increasing the stability of cryptographic algorithms in multi-user WEB resources based on random number generators that take into account the entropy of user behavior]. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*. V. 1. S. 167–173.
4. Mashtaliar, Ya. R., Kozachok, V. A., Brzhevska, Z. M. Bohdanov, O. M. (2023). Doslidzhennia rozvytku ta innovatsii kiberzakhystu na ob'iektakh krytychnoi infrastruktury [Research into the development and innovation of cyber protection at critical infrastructure facilities]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*. №2(22). S. 156–167.
5. Pliekhova, H. A., Kostikova, M. V. (2022). Aktualni problemy informatsiinoi bezpeky [Current problems of information security]. *Modeliuvannia ta informatsiini tekhnolohii v nautsi, tekhnitsi, kiberbezpeti ta osviti* : mat. Vseukr. nauk.-prakt. Internet-konf. Kharkiv : KhNADU. S. 68–73.
6. Fursov, I. I., Shmatko, O. V. (2021). Analiz statystychnykh pokaznykiv dyspersii, asymetrii ta ekstsesu pry vyznachenni porushen informatsiinoi bezpeky kiberfizychnykh system vitrovykh heneratoriv [Analysis of statistical indicators of dispersion, asymmetry and kurtosis in determining information security violations of cyber-physical systems of wind generators]. *Radioelectronic and Computer Systems*. №. 4(100). S.132–144.
7. Bachynskiy, R. V., & Kupetskiy, A. V. (2018). Systema kryptohrafichnoho zakhystu bluetooth zviazku mizh prystroiem internetu rechei ta mobilnym obchysliuvalnym prystroiem [System of cryptographic protection of bluetooth communication between an Internet of Things device and a mobile computing device]. Serii: Informatsiini systemy ta merezhi. *Visnyk NU "Lvivska politekhnika"*. № 887. S. 18–24.
8. Chernenko, R. M., Riabchun, O. P., Vorokhob, M. V., Anosov, A. O., Kozachok, V. A. (2021). Pidvyshchennia rivnia zakhyshchenosti system merezhi internetu rechei za rakhunok shyfruvannia danykh na prystroiakh z obmezhenymy obchysliuvalnymy resursamy [Increasing the security level of IoT systems by encrypting data on devices with limited computing resources]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*. № 3(11). S. 124–135.
9. Pasichnyk, V., Pasichnyk, A. (2025). Methods and algorithms for increasing reliability and level security of corporate telecommunications networks. *Matematychni modeliuvannia*. K. : DDTU. № 2(53). S. 30–37.

Дата першого надходження статті до видання: 30.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

Сохацький А. В., доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник Інституту транспортних систем та технологій Національної академії наук України
ORCID: 0000-0002-3593-6517

МОДЕЛЮВАННЯ ТУРБУЛЕНТНИХ ТЕЧІЙ НАВКОЛО НАЗЕМНИХ ТРАНСПОРТНИХ АПАРАТІВ З ЗАСТОСУВАННЯМ ГІБРИДНИХ ПІДХОДІВ

Практичне застосування прямого числового моделювання турбулентності (Direct Numerical Simulation – DNS) та методу моделювання великих вихорів (Large Eddy Simulation – LES) пов'язане з цілим рядом проблем. Це недостатня продуктивність обчислювальної техніки, а також ряд методичних проблем.

Протягом останніх десятиліть з'явилися моделі турбулентних течій, що передбачають одночасне використання методу LES та осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS). Це так звані гібридні RANS – LES моделі. Застосування гібридних підходів спрощує вирішення певних задач аеродинаміки. На сьогодні поширені декілька десятків моделей RANS – LES. Їх подальшому удосконаленню і розвитку присвячено величезне число робіт. Найпоширенішим методом став метод моделювання від'єднаних вихорів – Detached Eddy Simulation або DES. Це свідчить про позитивні сторони ідеї, що лежить в основі гібридних моделей. Проте і на сьогодні не має повної задоволеності вже існуючими моделями.

Побудова математичної моделі турбулентної течії і вимагає подальшого вивчення фізичних особливостей формування локальних нестационарних характеристик турбулентних потоків.

При числовому розв'язуванні задач аеродинаміки з використанням осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса розв'язується не самі диференціальні рівняння, а їх скінченно-різницеві аналоги. Необхідно коректно виконувати фізичні закони збереження маси, кількості руху, енергії. Це є непростою задачею для сіткових методів.

В роботі, для числового розв'язування задачі з розрахунку характеристик турбулентної течії навколо наземного транспортного засобу, обрано модель течії в'язкого стисливого газу, що описується осередненими за Рейнольдсом рівняннями Нав'є-Стокса. Використовується багатоблоковий підхід та криволінійна систему координат.

Для замикання осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса обрано метод DES, що є подальшим розвитком моделі турбулентності Спаларта – Аллмараса в реалізації відокремлених вихорів. Для проведення досліджень розроблено відповідну методіку, побудовано алгоритми та написано комплекс програмного забезпечення на мові програмування Fortran-95.

Виконано розрахунки турбулентної течії навколо високошвидкісного транспортного апарата з несучим корпусом поблизу шляхової структури. Отримано розподіл ізобар у площині XOY області течії, ізомех у площині XOY розрахункової області, ізоїнії складової вектора швидкості потоку у площині XOZ і області течії та ізоїнії завихреності у площині XOY області течії.

Ключові слова: моделювання турбулентності, числове моделювання, осереднені за Рейнольдсом нестационарні рівняння Нав'є-Стокса, моделювання від'єднаних вихорів, аеродинаміка транспортних апаратів.

Sokhatskyi A. V. Modeling of turbulent flows around ground transport vehicles using hybrid approaches

The practical application of Direct Numerical Simulation (DNS) and Large Eddy Simulation (LES) is associated with a number of problems. These include insufficient computing power and a number of methodological issues.

Over the past decades, models of turbulent flows have appeared that involve the simultaneous use of the LES method and Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS). These are the so-called hybrid RANS-LES models. The use of hybrid approaches simplifies the solution of certain aerodynamic problems. Today, there are several dozen RANS-LES models in use. A huge number of works are devoted to their further improvement and development. The most common method has become the detached eddy simulation (DES) method. This demonstrates the positive aspects of the idea underlying hybrid models. However, even today, there is no complete satisfaction with the existing models.

The construction of a mathematical model of turbulent flow requires further study of the physical characteristics of the formation of local unsteady characteristics of turbulent flows.

When solving aerodynamic problems numerically using Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, it is not the differential equations themselves that are solved, but their finite difference analogues. It is necessary to correctly apply the physical laws of conservation of mass, momentum, and energy. This is a difficult task for mesh methods.

In this work, for the numerical solution of the problem of calculating the characteristics of turbulent flow around a ground vehicle, a model of viscous compressible gas flow is chosen, which is described by Reynolds-averaged Navier-Stokes equations. A multi-block approach and a curvilinear coordinate system are used.



To close the Reynolds-centered Navier-Stokes equations, the DES method was chosen, which is a further development of the Spalart-Allmaras turbulence model in the implementation of isolated vortices. To conduct the research, an appropriate methodology was developed, algorithms were constructed, and a software package was written in the Fortran-95 programming language.

Calculations were performed for turbulent flow around a high-speed transport vehicle with a lifting body near a road structure. The distribution of isobars in the XOY plane of the calculation area, isochores in the XOY plane of the calculation area, isolines of the velocity vector component in the XOZ plane of the calculation area, and isolines of vorticity in the XOY plane of the calculation area were obtained.

Key words: turbulence modeling, numerical modeling, Reynolds-averaged unsteady Navier-Stokes equations, detached vortex modeling, aerodynamics of transport vehicles.

Постановка проблеми. Сучасні методи моделювання турбулентних течій побудовані на основі досягнень з вивчення фізичних властивостей в'язкої рідини та газу. Їх можна розділити на три групи: підходи, що базуються на використанні осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS); два класичних підходи – пряме числове моделювання турбулентності (Direct Numerical Simulation – DNS) і метод моделювання великих вихорів (Large Eddy Simulation – LES) [1–5, 8, 9, 11, 32, 35, 40]. Комплексну групу формують гібридні підходи, що спираються на спільне використання RANS і LES підходів для різних областей течії [1, 2, 5, 8, 9, 11, 23, 24, 28, 30–32].

На сьогодні найбільш поширеними підходами для числового розв'язування практичних задач є методи, що базуються на використанні осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS) [1–5, 8, 9, 11, 32]. Вони замикаються за допомогою тієї або іншої напівемпіричної моделі турбулентності.

Досвід математичного моделювання гідроаеродинамічних процесів показав, що найбільш досконалими є: пряме числове моделювання турбулентності (Direct Numerical Simulation – DNS) і метод моделювання великих вихорів (Large Eddy Simulation – LES) [1–6, 35]. Метод DNS ґрунтується на безпосередньому прямому числовому розв'язуванні тривимірних нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса з розрізненням усіх просторово-часових масштабів турбулентності [1–6, 29]. У методі LES також розв'язуються рівняння Нав'є-Стокса, але після проведення попередньої просторової фільтрації [1, 6, 29, 35, 45]. Цей підхід дозволяє виключити з розгляду частину просторово-часових масштабів, що дозволяє понизити вимоги до технічних характеристик обчислювальної техніки. Для урахування впливу відфільтрованих («підсіткових») масштабів турбулентності притягуються ті або інші напівемпіричні моделі турбулентності [1–6]. В науковій літературі, для підкреслення кардинальних відмінностей методу LES від підходів, що використовуються для замикання RANS, їх називають «підсітковими» [1–6].

До окремої групи слід було б віднести гібридні підходи, що спираються на використання RANS і LES підходів для різних областей течії [1–6, 45–47]. Вважається, що вони є найбільш розповсюдженими для практичного застосування, виходячи з можливостей обчислювальної техніки та меж їх використання [1–6, 45–47]. Проте універсальна модель опису турбулентної течії і на сьогодні відсутня.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Напівемпірична теорія турбулентності бере початок з класичної роботи О. Рейнольдса [6]. У ній був сформульований підхід для опису турбулентної течії, який згодом був названий його іменем. Таким чином з'явилися рівняння Рейнольдса. Або, як ще їх називають; осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса. У випадку нестисливої рідини рівняння Рейнольдса виходять з рівнянь Нав'є-Стокса з використанням наступної процедури осереднення:

$$\bar{f}(t) = \frac{1}{2T} \int_{t-T}^{t+T} f(\tau) d\tau, \quad (1)$$

де f – функція осереднення, t – час, а $2T$ – період осереднення.

Період осереднення передбачається досить великим в порівнянні з часовими масштабами усіх турбулентних неоднорідностей, що присутні даній течії, і досить малим в порівнянні з характерним часовим масштабом осередненої течії. Відповідно до роботи Рейнольдса [6], процедура осереднення припускає виконання наступних умов [2,5,6] :

$$\overline{f+g} = \bar{f} + \bar{g}, \quad \bar{c} = c, \quad \overline{cf} = c\bar{f}, \quad \overline{\partial f/\partial s} = \partial \bar{f}/\partial s, \quad (2)$$

де f, g – довільні функції, які можуть бути представлені як суми середніх і пульсаційних змінних $f = \bar{f} + f'$ та $g = \bar{g} + g'$, c – довільна константа, а s – просторова координата або час.

У випадку моделювання течії газу, що є стисливим, використовують більш досконалий спосіб осереднення. Він називається осереднення за Фавром. При цьому густина ρ і тиск p осереднюються за Рейнольдсом, а для інших змінних вводяться так звані середньозважені значення

$$\tilde{f} = \frac{\overline{\rho f}}{\bar{\rho}}. \quad (3)$$

У відповідності з даним підходом розрахунок турбулентних течій стисливої рідини проводиться шляхом безпосереднього розв'язування рівнянь Нав'є-Стокса, що осереднюються за Рейнольдсом для густини та тиску [2, 4].

Використання осереднення за Фавром приводить вихідну систему рівнянь до дещо простішого вигляду, оскільки не з'являються додаткові доданки в рівнянні нерозривності для нестисливих течій [2, 4]. При цьому нестационарний член в диференціальному рівнянні для кількості руху не вимагає додаткового моделювання. У роботі [7] на основі числового моделювання шару зміщення показано, що в діапазоні малих чисел Маха обидва способи осереднення приводять до однакових результатів [2, 4]. Є підстави вважати, що використання осереднення за Фавром у ряді випадків призводить до чисельної нестійкості через форму рівняння нерозривності [8]. Для подолання нестійкості в праву частину рівняння нерозривності необхідно додавати дифузійний член [2, 4].

Незважаючи на характер осередненої течії, її вимірність та стаціонарність чи нестационарність, необхідно розв'язувати тривимірні нестационарні рівняння Нав'є-Стокса [2, 4]. Це пов'язано з тим, що турбулентність є принципово тривимірним і нестационарним явищем [2–5]. На жаль для цілого ряду моделей забезпечення необхідної точності розрізнення усіх просторово-часових масштабів турбулентності є проблематичним [2–5].

Слід звернути увагу на те, що для цілого ряду моделей необхідно забезпечити достатню точність розрізнення усіх просторово-часових масштабів турбулентності.

Осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса (RANS) для досконалого стислого газу, можуть бути записані в наступному вигляді [2, 4]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k)}{\partial x_k} = 0, \\ \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_k)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} (\tau_{ik} + \tau_{t,ik}) - \frac{\partial p}{\partial x_i}, \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k H)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} [u_i (\tau_{ik} + \tau_{t,ik}) - (q_k + q_{t,k})], \\ \rho = pm/(RT), \end{cases} \quad (4)$$

де x_i – декартові координати ($i = 1, 2, 3$); u_i – компоненти вектора швидкості осередненої течії; $E = C_v T + u_k u_k / 2$, $H = E + p/\rho = E_p T + u_k u_k / 2E$ – питома повна енергія та повна ентальпія газу; T – температура; C_v , $C_p = C_v + R/m$ – питомі теплоємності при сталому об'ємі та постійному тиску; $R = 8314,34$ Дж/моль · (кмоль · К) – універсальна газова стала; m – молекулярна маса.

Компоненти тензора молекулярної в'язкості та вектора щільності теплового потоку за рахунок молекулярної теплопровідності визначаються відповідно за допомогою закону реології Ньютона та закону Фур'є [2, 4]

$$\tau_{ij} = 2\mu(T) \left[S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right], \quad q_i = \mu(T) \frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad (5)$$

де $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ – тензор швидкостей деформацій, δ_{ij} – символ Кронекера, а $\mu(T)$ і $\lambda(T)$ – коефіцієнти молекулярної динамічної в'язкості і теплопровідності.

Компоненти тензора рейнольдсових (турбулентних) напружень $\tau_{i,j} = -\overline{\rho u_i' u_j'}$ та вектора рейнольдсового (турбулентного) теплового потоку $q_{t,i} = -\rho C_p \overline{u_i' T'}$, записуються в рівняннях(4) при осередненні нелінійних конвективних членів вихідних рівнянь Нав'є-Стокса і перенесення енергії. Їх безпосередній зв'язок з параметрами осередненого руху залишається невідомим [2, 4].

Перевагою рівнянь RANS перед вихідними рівняннями Нав'є-Стокса є те, що вони сформульовані безпосередньо відносно осереднених за часом характеристик течії. Вони є вихідним результатом в задачах механіки рідини та газу. Зникає необхідність розрахунку локальних нестационарних характеристик турбулентних потоків шляхом інтегрування тривимірних нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса для DNS, що представляють основний інтерес в задачах аеродинаміки [2, 4].

Вважається, що в реальних умовах течії, на даний час розвитку обчислювальної техніки, проведення розрахунку локальних нестационарних характеристик турбулентних потоків є абсолютно неможливими [2–5]. Слід відзначити, що рівняння RANS є незамкнутими, оскільки вони містять невідомий тензор рейнольдсових напружень та вектор турбулентного теплового потоку [2, 4, 5]. Для їх практичного використання потрібні додаткові співвідношення, що зв'язують ці величини з характеристиками осередненого руху [2–8]. Ці додаткові співвідношення можна отримати шляхом використанням емпіричної інформації. Дані співвідношення прийнято називати моделями турбулентності для напружень Рейнольдса або для других моментів [2–8].

Альтернативний підхід до вирішення проблеми замикання рівнянь Рейнольдса полягає у використанні рівнянь перенесення рейнольдсових напружень, які формально можуть бути отримані з рівнянь Нав'є-Стокса за допомогою процедури осереднення за часом аналогічно тому, як це робиться при виведенні рівнянь Рейнольдса. Проте ці рівняння містять так звані моменти третього порядку ($\overline{u_i' u_j' u_k'}$). Їх зв'язок з параметрами осередненого руху і компонентами тензора рейнольдсових напружень (моментами другого порядку) є невідомий, і для їх визначення потрібне використання рівнянь перенесення для моментів третього порядку. Ці рівняння, у свою чергу, містять кореляції четвертого порядку і т. д., так що отримання строгої замкнутої системи рівнянь відносно статистичних характеристик турбулентності в принципі неможливе. У цій ситуації розумним компромісом видається обмеження моделювання рівняннями перенесення других моментів.

Надзвичайно проблематичним є питання, щодо значень кореляційних членів високих порядків. Ця емпірична інформація необхідна для замикання відповідних моделей турбулентності. Як відзначається в роботі [9], «обрив» описаного вище нескінченного «ланцюжка» на рівняннях перенесення других моментів неявно ґрунтується на тому, що не має теоретичних підтверджень про те, що із зростанням порядку модельованих кореляцій їх вплив на основні статистичні характеристики турбулентних потоків зменшується [10].

Певний час дослідники мали надію з розробки універсальної моделі турбулентності для замикання рівнянь RANS моделі. Проте проведені експериментальні та числові дослідження турбулентних течій розвіяли ці надії. Вони переконливо показали, що локальні осереднені характеристики турбулентних потоків піддаються істотному глобальному впливу стійких, великомасштабних, з розмірами порядку макро-масштабу течії, принципово тривимірних і нестационарних структур [2–9]. Характеристики цих структур залежать від конкретної геометрії даної течії та межових умов. Таким чином, гіпотеза локальності і осереднення характеристик турбулентних потоків, на якій в неявній формі будується RANS моделі турбулентності, не завжди виконується [2–9]. Це в принципі унеможливило побудову ідеальної моделі такого типу і робить згадані вище надії на можливість побудови універсальної RANS моделі турбулентності, по суті, нездійсненними [2, 3–5].

Дане ствердження в рівній мірі відноситься як до простих моделей, що базуються на гіпотезі Бусинеска про лінійний зв'язок між тензорами рейнольдсових напружень і швидкостей деформацій, так і до моделей перенесення рейнольдсових напружень [4].

Ознаки недосконалості напівемпіричних моделей турбулентності були виявлені з початком використання числових методів для розрахунку в'язких течій. При моделюванні відривних течій проявлялася їх неможливість урахувати певні фізичні характеристики. Необхідно було встановлювати межі використання тих чи інших напівемпіричних моделей турбулентності. Це сприяло розгортанню систематичних досліджень, спрямованих на визначення меж застосування напівемпіричних моделей турбулентності [1–10, 21–32].

Значна кількість публікацій, що присвячені удосконаленню відомих та створенню нових напівемпіричних моделей турбулентності підтверджували цілий ряд їх недоліків [3, 4]. Саме незадовільні результати числового моделювання з розрахунку відривних течій спричинили масу питань про їх коректність [3, 5, 21]. Багаточисельні дослідження сприяли розробці нових моделей турбулентності на основі використання RANS [2, 3, 5, 21]. Постало гостре питання про обґрунтований вибір тієї або іншої з них для розрахунку турбулентних течій.

Такі дослідження проводилися і продовжують проводитися, як окремими дослідницькими групами, так і у рамках масштабних міжнародних програм, координуваних NASA і Європейською комісією з розвитку наукових досліджень. Зокрема, NASA був створений спеціальний інтернет-портал, що постійно оновлюється [13]. На ньому приводяться формулювання найбільш поширених моделей турбулентності, «еталонні» результати розрахунків різних течій, отримані з їх використанням, і експериментальні дані, які можуть служити для валидації цих моделей [13]. Аналогічний ресурс був створений і підтримується «Європейською Спільнотою з Течій, Турбулентності і Горіння» (ERCOfTAC) [14]. На вирішення тієї ж проблеми з удосконалення і валидації моделей турбулентності спрямовано значне число міжнародних проектів, що фінансуються Євросоюзом та іншими організаціями: ECARP [15], FLOMANIA [16] і ATAAC [17].

Важливу роль в цій сфері відіграють спеціальні робочі семінари, на яких результати розрахунків, отримані окремими дослідницькими групами із застосуванням різних моделей турбулентності, порівнюються із спеціально відібраними експериментальними даними і з результатами розрахунків у рамках LES і DNS [10–17]. Цілеспрямовані зусилля наукових та проектних установ цілого ряду європейських країн сприяли накопичено важливої та, об'єктивної інформації про можливості різних моделей для використання рівнянь RANS [10–17].

Ця інформація є виключно важливою, оскільки, незважаючи на відмічені серйозні недоліки цих моделей, саме вони аж до теперішнього часу є, і ще довго залишатимуться основним робочим інструментом при проведенні практичних розрахунків турбулентних течій [2–6, 10–17]. Зростання технологічного рівня суспільства викликає потреби в розв'язуванні задач механіки рідини, газу та плазми, аеродинаміки транспортних апаратів та інших технічних пристроїв для багатьох галузей науки і техніки.

Мета статті. Числове моделювання в'язких турбулентних течій навколо транспортних апаратів, різноманітних технічних пристроїв та їх елементів є доволі складною проблемою. На сьогодні немає її універсальної математичної моделі, що будувалась би на основі об'єктивних фізичних законів, які б описували коректну поведінку динамічної системи [18–20].

Метою роботи є розгляд проблеми числового моделювання в'язких турбулентних течій навколо наземних транспортних апаратів, що рухаються над шляховою структурою. Для числового розв'язування поставленої задачі використовується гібридний підхід, вимогою до математичної моделі є адекватний опис властивостей системи з відповідним певним числом ступенів свободи. Така математична модель надасть можливість проводити подальші дослідження динамічних та аеродинамічних характеристик транспортних апаратів та їх складових.

Виклад основного матеріалу. Гібридні RANS – LES моделі з'явилися в кінці вісімдесятих на початку дев'яностих років двадцятого століття. Одним з найпоширеніших методів для практичного використання в аеродинаміці літальних апаратів, автомобілів, інших транспортних засобів став метод моделювання від'єднаних вихорів – Detached Eddy Simulation або DES.

На сьогодні, принаймні, поширені декілька десятків таких моделей. Їх подальшому удосконаленню і розвитку присвячено величезне число робіт [21]. Метод DES тримав і подальший розвиток – Delayed Detached Eddy Simulation (DDES) [21–25]. Це свідчить про позитивні сторони ідеї, що лежить в основі ряду гібридних моделей. Проте не має повної задоволеності вже існуючими моделями такого типу [2–6, 21–25].

Загальна концепція гібридних моделей турбулентних течій полягає в спробі побудови комбінованих моделей. Вони повинні функціонувати в одних областях течії як RANS, а в інших областях течії як LES. Формальна схожість рівнянь Рейнольдса (4) та рівнянь для LES надає певні переваги в чисельному розв'язуванні задачі. Найважливішою відмінністю різних форм гібридних моделей дозволяє реалізовувати шляхи числового розв'язування вихідних диференціальних різними методами.

Детальний огляд цих гібридних моделей представлено в цілому ряді наукових праць [17, 25–40, 45–47]. Проблеми розробки та удосконалення гібридних RANS – LES моделей постійно обговорюються на різноманітних міжнародних конференціях, симпозіумах і т.п. [2, 10–17].

Серед гібридних RANS – LES моделей широке розповсюдження отримав гібридний метод DES [31]. Необхідність розрахунків течій з великими відривними зонами, а також значні ресурсні вимоги до методу LES спонукали дослідників на розробку методу DES. Дослідження показали, що RANS моделі не дозволяють забезпечити коректний розрахунок таких течій [1–5].

LES метод вимагає залучення надмірно великих обчислювальних витрат, лівова частка яких пов'язана з розрахунком пристінної частини приєднаних примежових шарів, які містять енергонесучі вихори малих розмірів [22–29].

Все це сприяло створенню такої моделі, яка функціонувала б як RANS в області приєданого примежового шару і забезпечувала цілком прийнятну точність, і як LES у відривних областях потоку, де його використання не вимагає надмірно дрібних сіток [22–29]. Він отримав назву методу «моделювання від'єднаних вихорів», що підкреслює відмінність DES від LES. Це пояснюється тим, що у рамках DES «точно» розрізняються лише «від'єднані» вихори, які містяться у відривній зоні. Відносно дрібні вихори, що формуються у приєданому примежовому шарі, описуються звичайними напівемпіричними RANS моделями [5–18, 31].

Ще одна важлива особливість DES полягає в тому, що у рамках цього підходу у RANS і LES областях використовується одна і та ж «базова» фізична модель турбулентності, яка функціонує як RANS модель у середині пристінного примежового шару і як її підсітковий аналог далеко від твердих стінок [5, 23–29]. Межа поміж областями RANS і LES визначається в процесі розрахунку автоматично і залежить від кроків використовуваної обчислювальної сітки, від відстані від даної точки потоку до обтічної поверхні і, взагалі кажучи, від локальних параметрів потоку [1, 2, 5, 31].

Інтенсивний розвиток обчислювальної аеродинаміки сприяв появі цілого ряду гібридних DES методів [30–34]. У зв'язку з цим DES і інші аналогічні DES-подібні методи: Extra – Large Eddy Simulation або E-LES [34] і Limited Numerical Scales або LNS [36] часто не зовсім точно називають «незонними» («non-zonal») гібридними методами, щоб відрізнити їх від зонних гібридів, в яких RANS і LES області вибираються з тих або інших міркувань. До таких методів належить, наприклад, зонний DES (Zonal DES або ZDES), що розвивається в роботі [37]), а також ряд інших зонних підходів [5]. Цей метод має ряд переваг в порівнянні з DES, що полягають у більшій гнучкості. Проте його основний недолік полягає в необхідності апріорних уявлень про структуру течії, наприклад, про положення точки(лінії) відриву потоку [5].

Окрему групу гібридних RANS – LES методів представляють так звані моделі LES з пристінними моделюванням (Wall Modeled LES – WMLES), які можуть використовуватися для розрахунку не лише відривних, але і складних приєднаних турбулентних течій [38]. Ідея цих методів полягає у використанні RANS не в усьому пристінному примежовому шарі, як це робиться в DES, а тільки в його внутрішній області, тобто саме в тій області, на розрахунок якої доводяться основні обчислювальні витрати LES [39–40]. Проте спектр застосування WMLES є досить широким [39–40].

Останніми роками отримав розвиток ще один підхід до RANS-LES моделюванню турбулентності, що є найбільш загальною формою зонних методів і дістав назву вбудованого LES (Embedded LES), у рамках якої область LES може довільним чином розташовуватися усередині області RANS (рис. 1) [5, 41].

Це відкриває можливість використання обчислювального трудомісткого методу LES тільки в тих областях потоку, які не піддаються опису у рамках RANS, або в областях, для яких потрібно отримання

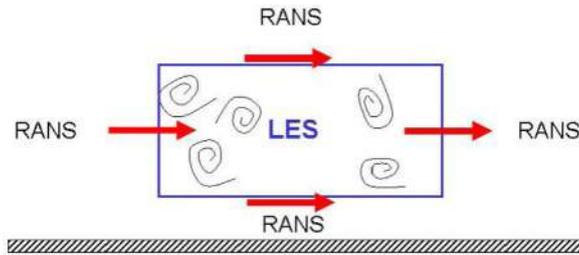


Рис. 1. Гібридний підхід для областей течії з застосування методів RANS та LES [5, 41]

інформації не лише про осереднені, але і про пульсаційні характеристики потоку [5, 39]. Така задача може виникнути при розв'язуванні зв'язаних задач аеродинаміки та пружності, акустики [5, 39]

Проте для їх практичної реалізації потрібні вирішення ряду складних фізичних проблем, пов'язаних з «зшиванням» RANS і LES розв'язків на межі областей. Так, при переході від LES до RANS розв'язування необхідно забезпечення плавного пригнічення турбулентних пульсацій [39].

В протилежність цьому, для досягнення швидкого переходу від повністю модельованої турбулентності в RANS області до «дозволеної» турбулентності в LES області на відповідних межах останньою необхідно вводити штучні збурення [17]. Незважаючи на значну кількість досліджень з моделювання турбулентних течій цілком задовільного рішення цих питань досі не знайдено [5, 17]. Окрім цього, програмна реалізація запропонованих методів є досить складною і істотним чином опирається на специфіку використовуваних обчислювальних сіток і структуру зберігання даних у відповідних обчислювальних кодах [17]. Це утрудняє, а іноді і унеможлиблює перенесення цих методів з одного коду в інший [5, 17].

На сьогодні розроблено ще так звані «безшовні» (seamless) RANS–LES гібриди, в яких обидва підходи тим або іншим чином «зважаються» і одночасно функціонують у всій розрахунковій області [43]. Найбільш відомим з них є метод, що базується на частково осереднених рівняннях Нав'є-Стокса, – Partially Averaged Navier-stokes або PANS [41]. Проте проблема коректного вибору вагових функцій, що автоматично забезпечують адекватні, у відповідності з локальним розміром сітки, ваги RANS і LES моделей в даній точці потоку залишається, по суті, невирішеною [41]. Це істотно обмежує практичне використання безшовних підходів RANS-LES.

Широкий досвід використання лінійних моделей свідчить про те, що і в наш час найбільш високий «рейтинг» серед них отримали дві моделі та їх модифікації [21, 31, 42–46] :

- модель перенесення турбулентної в'язкості [42, 45, 46] (модель Спаларта-Аллмараса або SA модель);
- модель перенесення кінетичної енергії турбулентності і питомої швидкості її дисипації [43, 44] ($k-\omega$ Shear Stress Transport модель Ментера або SST модель).

Проте серед гібридних RANS-LES методів найбільш поширеним залишається гібридний метод DES та його пізніші модифікації [40–47].

Для розв'язування задачі, з визначення параметрів турбулентної течії навколо транспортного апарата, математична модель побудована на фізичних властивостях в'язкої стисливої рідини. Система рівнянь Нав'є-Стокса осереднена за Рейнольдсом для довільної криволінійної системи координат запишеться [2-5]

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial (\hat{E} - \hat{E}_v)}{\partial \xi} + \frac{\partial (\hat{F} - \hat{F}_v)}{\partial \eta} + \frac{\partial (\hat{G} - \hat{G}_v)}{\partial \zeta} = \hat{H}, \quad (6)$$

де \hat{Q} – вектор невідомих змінних; $\hat{E}, \hat{F}, \hat{G}$ – вектори нев'язких потоків; $\hat{E}_v = \xi_x E_v + \xi_y F_v + \xi_z G_v$, $\hat{F}_v = \eta_x E_v + \eta_y F_v + \eta_z G_v$, $\hat{G}_v = \zeta_x E_v + \zeta_y F_v + \zeta_z G_v$ – вектори в'язких потоків; $\hat{H} = 1/j H$ – вектор джерельних членів.

В системі диференціальних рівнянь (6) n – компонентні вектори потоків $\hat{Q}, \hat{E}_i, \hat{F}_i, \hat{G}_i, \hat{E}_v, \hat{F}_v, \hat{G}_v$ записуються в залежності від використовуваної моделі турбулентності.

Для розв'язування системи рівнянь (6) використано метод контрольного об'єму [2, 4–5]. Основні засади методу контрольного об'єму (МКО) полягають в тому, що розглядаються класичні рівняння балансу деякої величини Q в контрольному об'ємі V , обмеженому поверхнею $S = \sum S_k$ з зовнішньою нормаллю \vec{n} [5]. Інтегруючи рівняння (6) по контрольному об'єму, отримаємо [5]:

$$\iiint_{\Delta V} \left[\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial (\hat{E} - \hat{E}_v)}{\partial \xi} + \frac{\partial (\hat{F} - \hat{F}_v)}{\partial \eta} + \frac{\partial (\hat{G} - \hat{G}_v)}{\partial \zeta} - H \right] dV = 0. \quad (7)$$

Застосовуючи до рівняння (7) теорему про середнє і Остроградського-Гаусса, отримаємо [5]:

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} = -\frac{1}{\Delta V} \iint_S \left[(\hat{E} - \hat{E}_v) n_x + (\hat{F} - \hat{F}_v) n_y + (\hat{G} - \hat{G}_v) n_z \right] dS + \hat{H}, \quad (8)$$

де S – поверхня навколо контрольного об’єму ΔV ; \vec{n} – вектор зовнішньої нормалі до поверхні S .
Верхній знак $[\sim]$ означає середнє значення шуканої функції за об’ємом:

$$\tilde{f} = \frac{1}{\Delta V} \iiint_{\Delta V} f dV. \quad (9)$$

Осереднені за Рейнольдсом рівнянь Нав’є-Стокса замкнено методом DES, що є подальшим розвитком моделі турбулентності Спаларта – Аллмараса в реалізації відокремлених вихорів [31, 45, 46]:

$$\frac{\partial(\rho\tilde{v})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\tilde{v}u_j) = E_t + F_t - G_t + T_t, \quad (10)$$

де $E_t = \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho(v + \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right) + C_{b2} \rho \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right]$ – дифузійний член, що задовольняє межовим умовам на стінці

$\tilde{v} = 0$; $F_t = C_{b1}(1 - f_{t2})\rho\tilde{S}\tilde{v}$ – вираз, що описує виробництво турбулентності в області і підтримує опис течії

в ламінарному підшарі; $G_t = C_{w1}f_w\rho\left(\frac{\tilde{v}}{d}\right)^2$ – вираз, що описує розпад турбулентності в ламінарному підшарі;

$T_t = f_{t1}\rho\Delta U^2 + f_{t2}\rho\frac{C_{b1}}{\kappa^2}\left(\frac{\tilde{v}}{d}\right)^2$ – вираз наближеного опису перехідного режиму з згладжувальними функціями f_{t1} , f_{t2} , які забезпечують перехід від ламінарного до турбулентного режиму в пристінній області.

Вихорова в’язкість розраховується за співвідношенням: $\mu_{nr} = \rho\tilde{v}f_{v1}$. Модель відокремлених вихорів (DES) формується шляхом заміни змінної d на \tilde{d} , яка визначається за формулою [45]

$$\tilde{d} \equiv \min(d, C_{DES}\Delta),$$

де $\Delta \equiv \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$, $C_{DES} = 0,65$ – стала моделі DES.

Для числового моделювання аеродинаміки наземного транспортного засобу, що рухається над шляховою структурою застосовано систему диференціальних рівнянь (6) замкнених моделлю турбулентності (9).

Для реалізації розробленої методики з розв’язування системи осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав’є-Стокса побудовано відповідні алгоритми та написано програмне забезпечення. Розроблений комплекс програмного забезпечення було протестовано на ряді класичних задач [5]. Результати розрахунків показали придатні результати для використання розробленого написано комплексу програмного забезпечення в біля екранній аеродинаміці

Тривимірна задача обтікання транспортного апарата, що рухається поблизу шляхової структури дозвуким потоком в’язкого газу є однією з складних задач аеродинаміки. На рис. 2. показано результати розрахунку параметрів течії навколо транспортного апарата з несучим корпусом поблизу шляхової структури дозвуким потоком:

- ізобари у площині XOY області течії;
- ізوماхи у площині XOY області течії;
- ізолінії складової вектора швидкості v у площині XOZ області течії;
- ізолінії завихреності у площині XOY області течії.

Числове розв’язування таких задач дозволяє аналізувати структуру течії навколо транспортного апарата та її вплив на формування аеродинамічних характеристик. Отримані результати можна використовувати при пошуку шляхів покращення динамічних характеристик транспортних апаратів.

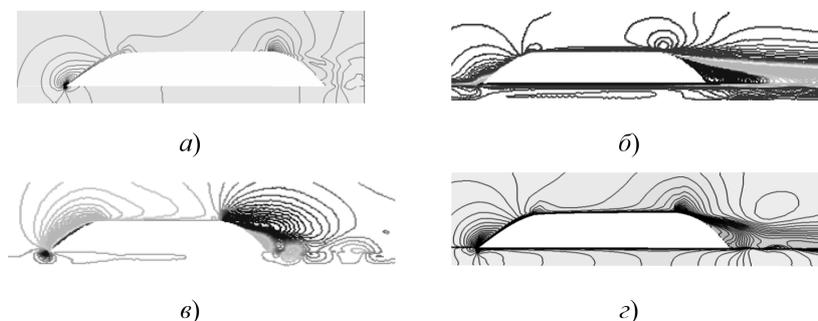


Рис. 2. Параметри турбулентної течії навколо транспортного апарата з несучим корпусом, що рухається над шляховою структурою:

a – ізобари у площині XOY області течії; b – ізوماхи у площині XOY області течії; v – ізолінії складової вектора швидкості V у площині XOZ області течії; z – ізолінії завихреності у площині XOY області течії

Висновки та перспективи подальших досліджень. Математичний та фізичний опис реальних аеродинамічних процесів, які описуються системами нелінійних диференціальних рівнянь, залишається невирішеним. Фізичні процеси в турбулентному русі рідини є надзвичайно складними. Значна кількість моделей її опису дозволяють розуміти окремі явища та властивості тільки частково. На сьогодні теорія турбулентності усе ще перебуває у стадії розробки й є ще далекою від свого завершення. Повний розрахунок реальних турбулентних течій поки що неможливий. На сьогодні головним інструментом розрахунку турбулентних течій залишаються числові методи.

Аналіз стану математичного моделювання турбулентних течій показує, що для їх практичного використання найбільш оптимальним методом є гібридні підходи типу DES. На найближчу перспективу ці методи є незамінними.

Динаміка розвитку електронно-обчислювальних машин, удосконалення експериментальних досліджень в гідроаеродинаміці та перспективні розробки нових методів розв'язування рівнянь математичної фізики дають надію на досягнення значних спіхів у числовому моделюванні реальних турбулентних течій навколо транспортних апаратів.

Список використаних джерел:

1. Shur M. L., Spalart P. R., Strelets M. Kh., Travin A. K. An enhanced version of DES with rapid transition from RANS to LES in separated flows. *Flow turbulence and combustion*. 2015. 95(4). P. 709–737.
2. Сохацький А. В. До питання числового моделювання аеродинаміки транспортних апаратів поблизу розділу середовищ. *Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XXVII міжнар. наук.-практ. конф.*, м. Київ, 14 червня 2023 р. Том 2 № 27. С. 55–58.
3. Приходько О. А., Сохацький А. В. Математичне та експериментальне моделювання аеродинаміки елементів транспортних систем поблизу екрану. Дніпропетровськ : Наука та освіта, 1998. 160 с.
4. Сохацький А. В. Теоретичні основи створення аеродинамічних компонувань перспективних швидкісних транспортних апаратів: дис. доктора технічних наук: 05.07.01. Дніпропетровськ, 2010. 364 с.
5. Сохацький А. В. До проблеми математичного моделювання турбулентних течій навколо транспортних апаратів. *Системи та технології*. 2021. № 2 (62). С. 5–36.
6. Reynolds O. On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 1895. P. 123–161.
7. Freund J. B., Moin P., Lele S. K. Compressibility effects in a turbulent annular mixing layer. *Flow Physics and Computation Division*. Technical Report TF-72. Stanford University. 1997.
8. Boersta B. I., Lele S. K. Large eddy simulation of compressible turbulent jets. Center for Turbulence Research. Stanford University. 1999. P.365–377.
9. Spalart P. R. Philosophies and fallacies in turbulence modeling. *Progress in Aerospace Sciences*. 2015. 74(1). P. 1–15
10. Hanjalić K., Launder B. Modelling Turbulence in Engineering and the Environment: Second-Moment Routes to Closure. Cambridge University Press, 2011. 402 p.
11. Spalart P. R., Shur M. L. On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature. *Aerospace science and technology Journal*. 2015. Vol. 1, № 5. P. 297–366.
12. David C. Wilcox. Turbulence Modeling for CFD. [книга] 3rd ed. DCW, 2006. 522p.
13. «Turbulence modeling Resource. NASA Langley Research Center», (page curator and responsible official C. Rumsey). URL: <https://turbmodels.larc.nasa.gov/>
14. Haase W., Chaput E., Elsholz E., Leschziner M. A., Müller U. R. ECARP – European Computational Aerodynamics Research Project: Validation of CFD Codes and Assessment of Turbulence Models. *Notes on Numerical Fluid Mechanics*. 1997. v. 58. URL: http://www.ercoftac.org/products_and_services/wiki/
15. Stephen B. P. Turbulent Flows. Cambridge University Press. 2000. 807p
16. Haase W., Aupoix B., Bunge U., Schwamborn D. FLOMANIA – A European Initiative on Flow Physics Modelling. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. 2006. v.94 URL: <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/flomania/>.
17. ATAAC: Advanced Turbulence Simulation for Aerodynamic Application Challenges. EU 7th Framework Programme Berlin. 2025. URL: <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/twiki/bin/view/ATAAC>
18. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. *The basic experiment*. Monthly Weather Review. 1963. 91, P. 99–164.
19. Deardorff J. A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*. 1970. N41(2). P. 453–480.
20. Grinstein F. F., Margolin L. G., Rider W. J. Implicit Large Eddy Simulation. Cambridge University Press. 2007. 577 p.
21. Shur M., Strelets M., Travin A. High-Order Implicit Multi-Block Navier-Stokes Code: Ten-Years Experience of Application to RANS/DES/LES/DNS of Turbulent Flows. *Invited lecture. 7th Symposium on Overset Composite Grids and Solution Technology*. October 5–7. 2004. Huntington Beach, USA. 2004.

-
22. Spalart P. R., Shur M. L. On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature. *Aerospace science and technology Journal*. 1997. Vol. 1. No 5. P. 297–366.
 23. Shur M. L., Spalart P. R., Strelets M. Kh., Travin A. K. Navier-Stokes simulation of shedding turbulent flow past a circular cylinder and a cylinder with a backward splitter plate. *Proceedings of the 3rd ECCOMAS CFD Conference*, Paris, France, 9–13 September 1996. Chichester: John Wiley & Sons, 1996. P. 676–682.
 24. Spalart P. R., Jou W. H., Strelets M. Kh., Allmaras S. R. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. *Proceedings of the 1-st AFOSR International Conference on DNS/LES*, Ruston, Louisiana, 4–8 August 1997. Louisiana Technical University. 1997. P. 137–148.
 25. Spalart P. R. Strategies for turbulence modelling and simulations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2000. V. 21, No. 3. P. 252–263.
 26. You D., Moin P. A dynamic global-coefficient subgrid-scale eddy-viscosity model for large-eddy simulation in complex geometries. *Physics of Fluids*. 2007. 19(6), 065110.
 27. Sagaut P., Deck S., Terracol M. Multiscale and multiresolution approaches in turbulence. *Imperial College Press.*, 2006. 340 p
 28. Menter F. R., Schütze J., Gritskevich M. S. Global vs. Zonal Approaches in Hybrid RANS-LES Turbulence Modelling. Hybrid RANS-LES Modelling. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. 2012. 117. pp. 15–28.
 29. Larsson J., Kawai S., Bodart J., Bermejo-Moreno I. Large eddy simulation with modeled wall-stress: recent progress and future directions. *Mechanical Engineering Reviews*. 2015. 00418.
 30. Peng S.-H., Haase W., (Eds.) Advances in Hybrid RANS-LES Modelling. *Papers Contributed to the 2007 Symposium on Hybrid RANS-LES Methods*. Corfu, Greece, 17–18 June 2007. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. v. 97. 2008.
 31. Spalart P. R., Deck S., Shur M. L., Squires K. D., Strelets M. Kh., Travin A. K. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*. July 2006. P. 181–195.
 32. Peng S.-H., Doerffer P., Haase W., (Eds.) Progress in Hybrid RANS-LES Modelling. *Papers Contributed to the 3rd Symposium on Hybrid RANS-LES Methods*. Gdansk, Poland, June 2009. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. v. 111. 2010.
 33. Fu S., Peng S.-H., Haase W., Schwamborn D. (Eds.) Progress in Hybrid RANS-LES Modelling. *Papers Contributed to the 4th Symposium on Hybrid RANS-LES Methods*. Beijing, China. September 2011. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. v. 117. 2012.
 34. Girimaji S., Peng S.-H., Haase W., Schwamborn D. (Eds.) Progress in Hybrid RANS-LES Modelling. *Papers Contributed to the 5th Symposium on Hybrid RANS-LES Methods*. College Station, A&M University, Texas, USA, 19–21 March 2014. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. v. 130, 2015.
 35. Kok J. C., Dol H. S., Oskam B., van der Ven H. Extra-large eddy simulation of massively separated flows, *AIAA Paper*. AIAA-2004-0264.
 36. Batten P., Goldberg U., Chakravarthy S. Sub-grid turbulence modeling for unsteady flow with acoustic resonance. *AIAA Paper*. AIAA-2000-0473.
 37. Deck S. Recent improvements in the Zonal Detached Eddy Simulation (ZDES) formulation. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*. 2011. N26(6). P. 523–550.
 38. Piomelli U., Balaras E. Wall-Layer Models for Large-Eddy Simulations. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2002. 36(1), P. 505–374.
 39. Shur M. L., Spalart P. R., Strelets M. K., Travin A. K. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2008. 29. P. 1638–1649.
 40. Terzi D., Frohlich J. Hybrid LES/RANS methods for the simulation of turbulent flows. *Progress in Aerospace Sciences*. 2008, N44(5). P. 349–377.
 41. Girimaji S., Sreenivasan R., Jeong E., PANS Turbulence Model for Seamless Transition Between RANS, LES: Fixed-Point Analysis and Preliminary Results. FEDSM2003-45336. *Proceedings of ASME 222 FEDSM'03 2003 4th ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conferences*. July 13-16. Honolulu, Hawaii USA. 2003
 42. Spalart P. R., Allmaras S. R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *AIAA Paper*. AIAA-1992-0439.
 43. Menter F. R. Zonal two-equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA Paper*. AIAA-1993-2906.
 44. Menter, F. R., Kuntz, M. and Langtry, R. Ten Year of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. *In: Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*. Begell House, Inc., Redding. 2003. p. 625–632.
 45. Spalart P. R., Jou W. H., Strelets M. L., Allmaras S. R. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. *Proceedings of first AFOSR international conference on DND/LES*. 1997.
 41. Spalart P. R. Strategies for turbulence modeling and simulations. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2000, 21, pp. 252–263.
 42. Forsythe J., Squires K., Wurtzler K., Spalart P. Detached-eddy simulation of fighter aircraft at high alpha. *AIAA Paper*. AIAA-2002-0591.
-

43. Сохацький А. В. Деякі питання математичного моделювання турбулентних течій навколо транспортних апаратів та їх елементів. *Системи та технології*. 2025. № 1(69). С. 33–44.

References:

1. Shur, M. L., Spalart, P. R., Strelets, M. Kh., Travin, A. K. (2015). An enhanced version of DES with rapid transition from RANS to LES in separated flows. *Flow turbulence and combustion*. (4), 709–737.
2. Sokhatskyi, A. V. (2023). Do pytan'nia chyslovoho modeliuвання aerodynamiky transportnykh aparativ poblyzu rozdilu seredovyshch. *Hidroaeromekhanika v inzhenernii praktytsi: materialy XXVII mizhnar. nauk.-prakt. konf.* (Tom 2, № 27, s.55–58). 14 chervnia Kyiv.
3. Prykhodko, O. A., Sokhatskyi, A. V. (1998). Matematychnе ta eksperymentalne modeliuвання aerodynamiky elementiv transportnykh system poblyzu ekranu. Dnipropetrovsk : *Nauka ta osvita*.
4. Sokhatskyi, A. V. (2010). Teoretychni osnovy stvorennia aerodynamichnykh komponovan perspektyvnykh shvydkisnykh transportnykh aparativ: dys. doktora tekhnichnykh nauk. Dnipropetrovsk.
5. Sokhatskyi, A. V. (2021). Do problemy matematychnoho modeliuвання turbulentnykh techi navkolo transportnykh aparativ. *Systemy ta tekhnolohii*. (2), 5–36.
6. Reynolds, O. (1895). On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 123–161.
7. Freund, J. B., Moin, P., Lele, S. K. (1997). Compressibility effects in a turbulent annular mixing layer. *Flow Physics and Computation Division*. Technical Report TF-72. Stanford University.
8. Boersta, B. I., Lele, S. K. (1999) Large eddy simulation of compressible turbulent jets. Center for Turbulence Research. Stanford University. 365–377.
9. Spalart, P. R. (2015). Philosophies and fallacies in turbulence modeling. *Progress in Aerospace Sciences*. 74(1), 1–15.
10. Hanjalić, K., Launder, B. Modelling (2011). *Turbulence in Engineering and the Environment: Second-Moment Routes to Closure*. Cambridge University Press.
11. Spalart, P. R., Shur, M. L. (2015). On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature. *Aerospace science and technology Journal*. Vol. 1, (5). P. 297–366.
12. Wilcox, D. C. (2006). *Turbulence Modeling for CFD*. 3rd ed. DCW.
13. Turbulence modeling Resource. (2025) NASA Langley Research Center», (page curator and responsible official C. Rumsey). Retrieved from: <https://turbmodels.larc.nasa.gov/>
14. Haase, W., Chaput, E., Elsholz, E., Leschziner, M. A., Müller, U. R. (1997). ECARP – European Computational Aerodynamics Research Project: Validation of CFD Codes and Assessment of Turbulence Models. *Notes on Numerical Fluid Mechanics*. (58). Retrieved from: http://www.ercotac.org/products_and_services/wiki/
15. Stephen, B. P. (2000), *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.
16. Haase, W., Aupoix, B., Bunge, U., Schwamborn, D. (2006) FLOMANIA – A European Initiative on Flow Physics Modelling. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. (94), Retrieved from: <http://cfm.mace.manchester.ac.uk/flomania/>
17. ATAAC: Advanced Turbulence Simulation for Aerodynamic Application Challenges. *EU 7th Framework Programme*. Berlin. 2025 Retrieved from: <http://cfm.mace.manchester.ac.uk/twiki/bin/view/ATAAC>.
18. Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations. *The basic experiment*. Monthly Weather Review. (91), 99–164.
19. Deardorff, J. (1970). A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*. (2), 453–480.
20. Grinstein, F. F., Margolin, L. G., Rider, W. J. (2007). *Implicit Large Eddy Simulation*. Cambridge University Press.
21. Shur, M., Strelets, M., Travin, A. (2004). High-Order Implicit Multi-Block Navier-Stokes Code: Ten-Years Experience of Application to RANS/DES/LES/DNS of Turbulent Flows. *Invited lecture. 7th Symposium on Overset Composite Grids and Solution Technology*. October 5–7. 2004. Huntington Beach, USA.
22. Spalart, P. R., Shur M. L. (1997). On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature. *Aerospace science and technology Journal*. Vol. 1, (5). P. 297–366.
23. Shur, M. L., Spalart, P. R., Strelets, M. Kh., Travin, A. K. Navier-Stokes simulation of shedding turbulent flow past a circular cylinder and a cylinder with a backward splitter plate. *Proceedings of the 3rd ECCOMAS CFD Conference*. (p. 676–682), Paris, France, 9-13 September 1996. Chichester: John Wiley & Sons.
24. Spalart, P. R., Jou, W. H., Strelets, M. Kh., Allmaras, S. R. (1997). Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. *Proceedings of the 1-st AFOSR International Conference on DNS/LES*, (P. 137–148.) Ruston, Louisiana, 4–8 August. Louisiana Technical University.
25. Spalart, P. R. (2000). Strategies for turbulence modelling and simulations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. V. 21, (3), P. 252–263.

-
26. You, D., Moin, P. (2007). A dynamic global-coefficient subgrid-scale eddy-viscosity model for large-eddy simulation in complex geometries. *Physics of Fluids*. 19(6), 065110.
 27. Sagaut, P., Deck, S., Terracol, M. (2006). Multiscale and multiresolution approaches in turbulence. *Imperial College Press*.
 28. Menter, F. R., Schütze, J., Gritskevich, M. S. (2012). Global vs. Zonal Approaches in Hybrid RANS-LES Turbulence Modelling. Hybrid RANS-LES Modelling. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. (117). 15–28.
 29. Larsson, J., Kawai, S., Bodart, J., Bermejo-Moreno, I. (2015). Large eddy simulation with modeled wall-stress: recent progress and future directions. *Mechanical Engineering Reviews*. 00418.
 30. Peng, S.-H., Haase, W., (Eds.) (2008). Advances in Hybrid RANS-LES Modelling. *Papers Contributed to the 2007 Symposium on Hybrid RANS-LES Methods*. Corfu, Greece, 17–18 June 2007. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. v. 97.
 31. Spalart, P. R., Deck, S., Shur, M. L., Squires, K. D., Strelets, M. Kh., Travin, A. K. (2006). A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*. (7), 181–195.
 32. Peng, S.-H., Doerffer, P., Haase, W., (Eds.) (2010). Progress in Hybrid RANS-LES Modelling. *Papers Contributed to the 3rd Symposium on Hybrid RANS-LES Methods*. Gdansk, Poland, June 2009. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. v. 111.
 33. Fu, S., Peng, S.-H., Haase, W., Schwamborn, D. (Eds.) (2012). Progress in Hybrid RANS-LES Modelling. *Papers Contributed to the 4th Symposium on Hybrid RANS-LES Methods*. Beijing, China. September 2011. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. v. 117.
 34. Girimaji, S., Peng, S.-H., Haase, W., Schwamborn, D. (Eds.) (2015). Progress in Hybrid RANS-LES Modelling. *Papers Contributed to the 5th Symposium on Hybrid RANS-LES Methods*. College Station, A&M University, Texas, USA, 19–21 March 2014. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. v. 130.
 35. Kok, J. C., Dol, H. S., Oskam, B., van der Ven, H. (2004). Extra-large eddy simulation of massively separated flows, *AIAA Paper*. AIAA-2004-0264.
 36. Batten, P., Goldberg, U., Chakravarthy, S. (2000). Sub-grid turbulence modeling for unsteady flow with acoustic resonance. *AIAA Paper*. AIAA-2000-0473.
 37. Deck S. (2011) Recent improvements in the Zonal Detached Eddy Simulation (ZDES) formulation. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*. (6), 523–550.
 38. Piomelli, U., Balaras, E. (2002). Wall-Layer Models for Large-Eddy Simulations. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 36(1), 505–374.
 39. Shur, M. L., Spalart, P. R., Strelets, M. K., Travin, A. K. (2008). A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. (29). 1638–1649.
 40. Terzi, D., Frohlich, J. (2008) Hybrid LES/RANS methods for the simulation of turbulent flows. *Progress in Aerospace Sciences*. 44(5). 349–377.
 41. Girimaji, S., Sreenivasan, R., Jeong, E., PANS Turbulence Model for Seamless Transition Between RANS, LES: Fixed-Point Analysis and Preliminary Results. FEDSM2003-45336. *Proceedings of ASME 222 FEDSM'03 2003 4th ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conferences*. July 13–16. 2003. Honolulu, Hawaii USA.
 42. Spalart, P. R., Allmaras, S. R. (1992). A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *AIAA Paper*. AIAA-1992-0439.
 43. Menter, F. R. (1993). Zonal two-equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA Paper*. AIAA-1993-2906.
 44. Menter, F. R., Kuntz, M. and Langtry, R. (2003). Ten Year of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. *In: Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*. (p. 625–632). Begell House, Inc., Redding.
 45. Spalart, P. R., Jou, W. H., Strelets, M. L., Allmaras, S. R. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. *Proceedings of first AFOSR international conference on DND/LES*. 1997.
 46. Spalart, P. R. (2000). Strategies for turbulence modeling and simulations. *Int. J. Heat Fluid Flow*, (21), 252–263.
 47. Forsythe, J., Squires, K., Wurtzler, K., Spalart, P. (2002). Detached-eddy simulation of fighter aircraft at high alpha. *AIAA Paper*. AIAA-2002-0591.
 48. Sokhatskyi, A. V. (2025). Deiaki pytannia matematychnoho modeliuvannia turbulentykh techii navkolo transportnykh aparativ ta yikh elementiv. *Systemy ta tekhnolohii*. (1), 33–44.

Дата надходження статті: 03.12.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

УДК 004.75

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2026-1-71.5>

Гуменюк А. О., здобувач вищої освіти
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0007-3202-8154

Отрох С. І., доктор технічних наук, професор,
професор кафедри цифрових технологій в енергетиці
Національного технічного університету України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-9008-0902

ПІДВИЩЕННЯ ДОСТУПНОСТІ ДАНИХ У ПІРИНГОВИХ СИСТЕМАХ З АДРЕСАЦІЮ ВМІСТУ ЗА РАХУНОК ПРОАКТИВНОЇ РЕПЛІКАЦІЇ

Сучасні децентралізовані системи, зокрема IPFS, здебільшого використовують підхід «pull-on-demand», за якого реплікація виникає лише як побічний ефект від вилучення даних. Це призводить до низької доступності у невеликих мережах, де кількість активних вузлів замала для формування достатньої кількості копій.

У статті розглянуто підхід до підвищення доступності даних у пірингових системах з адресацією вмісту шляхом проактивної реплікації та детермінованого розміщення блоків.

Розроблено та проаналізовано механізм, що забезпечує передбачувану доступність даних без суттєвого збільшення координації між вузлами та зберігає сумісність із DHT. Сформовано вимоги до протоколу розміщення даних у пірингових мережах, розроблено модель проактивної реплікації, узгоджену з розподілом блоків у просторі ключів, а також оцінено здатність запропонованого підходу до зменшення навантаження на окремі вузли та забезпечення вищої доступності даних.

Запропоновано підхід, який інтегрує маршрутизацію за допомогою DHT з механізмом розміщення, що базується на ідентифікаторах блоків, які визначають їх позицію у просторі ключів. Впроваджено дворівневу модель закріплень: жорсткі закріплення гарантують постійне зберігання блоків, тоді як м'які створюються автоматично під час реплікації та мають обмежений термін дії, який продовжується при повторному доступі; збирач сміття інтерпретує комбінацію закріплень, щоб вирішити, які блоки можна безпечно видалити, зберігаючи лише релевантні та часто використовувані дані.

Експериментально показано, що запропонований підхід дозволяє зменшити навантаження на окремі вузли в мережі та підвищити стійкість системи до відмов, що робить його перспективним для використання у малих приватних пірингових мережах із підвищеними вимогами до доступності.

Ключові слова: пірингові мережі, адресація вмісту, DHT, проактивна реплікація.

Humeniuk A. O., Otrakh S. I. Improving Data Availability in Peer-to-Peer Content-Addressed Systems through Proactive Replication

Modern decentralized systems, including IPFS, predominantly employ a “pull-on-demand” approach, in which replication occurs only as a side effect of data retrieval. This leads to low availability in small networks where the number of active nodes is insufficient to naturally form an adequate number of copies.

The paper examines an approach to improving data availability in peer-to-peer content-addressable systems through proactive replication and deterministic block placement.

A mechanism is developed and analyzed that ensures predictable data availability without substantially increasing coordination among nodes and while preserving compatibility with DHTs. The requirements for a data-placement protocol in peer-to-peer networks are formulated, a proactive replication model, aligned with block distribution in the keyspace is proposed; and the capability of the approach to reduce load on individual nodes and achieve higher data availability is evaluated.

Solution that integrates DHT-based routing with a placement mechanism driven by block identifiers that determine their position in the keyspace is proposed. Two-tier pinning model is introduced: hard pins guarantee persistent storage of blocks, whereas soft pins are created automatically during replication and have a limited lifetime that is extended upon repeated access.



© А. О. Гуменюк, С. І. Отрох, 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

A garbage collector interprets combinations of pins to determine which blocks may be safely removed, retaining only relevant and frequently used data.

Experimental results demonstrate that the proposed approach decreases the load on individual nodes and increases the system's resilience to failures, making it a promising option for small private peer-to-peer networks with stringent availability requirements.

Key words: *peer-to-peer networks; content addressing; DHT; proactive replication.*

Постановка проблеми. У міру збільшення обсягу даних, потреба в розподілених системах та механізмах, що вони пропонують стає все більш нагальною. Традиційні централізовані сховища даних швидко досягають ліміту пропускної здатності та ємності. У свою чергу, розподілені – дозволяють без особливих труднощів масштабувати ці параметри.

Звісно, децентралізованість системи додає цілу низку нових проблем, вирішення яких є необхідним для їх ефективної та коректної роботи. Основним питанням є забезпечення передбачуваної доступності. Хоча сучасні системи і намагаються його вирішити, проте здебільшого зосереджуються на моделі «pull on demand» (вилучення при потребі), тобто в першу чергу виявленні провайдерів, а не розміщенні контенту, що спричиняє реплікацію даних лише як побічний ефект при їх вилученні. Такий підхід розкриває свій потенціал лише при масштабованому розгортанні, де частий доступ до даних природно призводить до їх реплікації. У контексті малих приватних мереж пасивна реплікація призводить до малої кількості провайдерів, що своєю чергою призводить до концентрації даних на окремих вузлах та використанню сторонніх централізованих сервісів та блокчейну для покращення доступності даних.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Пірингові системи з адресацією вмісту, організують пошук і передавання даних за допомогою розподіленої хеш-таблиці та унікальних ідентифікаторів вмісту. За відсутності проактивної реплікації, дані фактично зберігається на одному або невеликій кількості вузлів, доки інші учасники мережі не звернуться за ними. Вихід такого вузла з мережі безпосередньо збільшує ймовірність втрати доступу до даних.

Дослідження, наведене в роботі [1], показує, що навіть відкрита мережа IPFS характеризується дуже обмеженим рівнем автоматичного дублювання: лише 2,7 % об'єктів мають понад п'ять копій на різних вузлах. Вбудований механізм ґрунтується переважно на ручному закріпленні (pinning), коли оператор вузла свідомо позначає дані як такі, що необхідно зберігати. Більш систематичним рішенням є IPFS Cluster – доповнення до інфраструктури IPFS, що групує та координує декілька вузлів для синхронізованого закріплення даних. Варто зазначити, хоча це в більшості й усуває питання єдиної точки відмови, проте не є рішенням на рівні протоколу.

Інші системи, безпосередньо, реалізують механізми активної реплікації шляхом копії даних на певні вузли вже під час початкового завантаження. Наприклад, Swarm копіює кожен фрагмент файлу до сусідніх вузлів. Водночас такий підхід потребує окремого механізму координації, здатного гарантувати, що при виході одного учасника з мережі відповідальність за зберігання його частини даних буде автоматично перерозподілена між іншими вузлами.

Додатковою проблемою є вартість підтримки самої DHT. Щоб таблиця залишалася актуальною та коректно відображала стан мережі, вузли мають періодично обмінюватися службовими повідомленнями, оновлювати маршрути та перевіряти доступність один одного. Результати, наведеними в роботі [3], демонструють, що продуктивність IPFS під час операцій читання та запису в приватних мережах суттєво поступається централізованим клієнт-серверним рішенням.

Альтернативним напрямом є використання блокчейн-технологій, таких як Filecoin або Arweave. Ці системи поєднують ідеї розподіленого реєстру (distributed ledger) та децентралізованого сховища файлів. Теоретично вони мають забезпечувати високу доступність даних, оскільки сама природа блокчейну стимулює реплікацію історії транзакцій усіма учасниками мережі за допомогою різних алгоритмів узгодження.

Мета та задачі дослідження. Дана робота зосереджена на розробці та аналізі підходу, спрямованого на підвищення продуктивності й надійності пірингових систем з адресацією вмісту. Запропоноване рішення не заперечує використання DHT, як основи для маршрутизації та пошуку даних, а доповнює її механізмом проактивної реплікації у поєднанні з гнучкою моделлю закріплення блоків.

У межах дослідження розглядається, чи здатна активна реплікація даних разом із чітко визначеною політикою вилучення зменшити навантаження на окремі вузли та підвищити загальну доступність вмісту в мережі. Буде сформульовано загальні вимоги до протоколу, запропоновано модель закріплення даних та видалення даних, а також зібрано необхідні метрики для оцінки поведінки та ефективності запропонованої системи.

Результати дослідження і їх обговорення. Запропонована система є розширенням подібних пірингових мереж на основі DHT. Для ідентифікації даних використовується концепт адресацію за вмістом, де кожен блок є хешем його вмісту:

$$ID(B) = H(B), \quad (1)$$

де B – блок даних, H – обрана хеш-функція.

Блоки об'єднуються у граф(Merkle DAG), посилаючись на ідентифікатори вмісту: листям графу є блоки з даними, що об'єднуються у вузли які своєю чергою є ідентифікаторами рівнем нижче. Запис провайдера – елемент, що поєднує DHT з адресацією вмісту та вказує на те, що вузол має дані пов'язані з шуканим ідентифікатором.

Процес вилучення файлу з мережі складається з наступних кроків:

1. Клієнт надсилає запит до DHT для пошуку провайдерів кореневого блоку;
2. DHT повертає множину кандидатів (один або кілька вузлів);
3. Клієнт паралельно запитує блоки у кількох провайдерів та обходить граф зверху вниз;
4. Кожен блок перевіряється на цілісність за хешем та у разі помилки клієнт перемикається на іншого провайдера.

Розміщення блоку у мережі визначено ідентифікаторами його вмісту, що гарно поєднується із використанням DHT. Оскільки хеш-функція рівномірно розподіляє значення у просторі ключів, кожен блок природним чином потрапляє в певний діапазон. Вузол з ідентифікатором N_i відповідає за блок, якщо виконується умова:

$$d(ID(B), N_i) = ID(B) \otimes N_i = \min_j (ID(B) \otimes N_j), \quad (2)$$

де B – блок даних, N_i – ідентифікатор поточного вузла, N_j – ідентифікатор будь-якого іншого вузла в мережі. Таким чином, уникається локалізація даних на окремих вузлах і досягається більш рівномірний розподіл навантаження на мережу.

Локальне розміщення блоку на конкретному вузлі визначається відповідно до низки узгоджених політик, які регламентують, у яких випадках вузол має прийняти блок у локальне сховище та довго його зберігати та за яких умов він може бути видалений.

Локальне розміщення блоку визначається за наступними політиками:

– Під час розміщення не досягнуто мінімальної кількості копії через невдалі запити чи відповідно до власних налаштувань вузла у відмові приймати сторонні блоки.

– Кореневі блоки завжди зберігаються локально в пам'яті вузла публікатора. Така політика дозволяє відновити дані з локального кешу за допомогою републікації, навіть якщо частина копій у мережі була втрачена.

– Вузол приймає фіксовану частку блоків, у яких ідентифікатор в числовій формі має значення менше за визначене відповідно до власних налаштувань. Формально політику можна описати як:

$$\frac{ID(B)}{2^k} < p_i, p_i \in (0,1], ID(B) \in \{0,1, \dots, 2^k - 1\}, \quad (3)$$

де p_i – фракція блоків, яку вузол готовий зберігати локально, B – блок даних, k – кількість бітів в ідентифікаторі або розмір простору ключів мережі.

На практиці це дозволяє досягнути пропорційного розподілу блоків розосереджених у мережі та тих, що скупчуються на окремих вузлах. Це дозволяє децентралізувати дані, при цьому даючи контроль вузлам над власними ресурсами.

Збереження файлів у мережі забезпечується через механізм закріплення блоків. Закріплення слугує ознакою того, чи дозволено збирачеві сміття видалити відповідний блок. У системі передбачено два типи закріплення – жорсткі (hard pins) та м'які (soft pins), які відрізняються як способом створення, так і правилами свого життєвого циклу.

Жорсткі закріплення можуть бути визначені лише користувачем та не мають терміну. Вони не мають терміну дії та інтерпретуються як вимога зберігати відповідний блок, доки користувач не скасує закріплення. Жорстке закріплення не дозволяє видалити блок збирачем сміття при жодних умовах.

М'які закріплення, навпаки, є рекомендацією щодо тимчасового збереження блоку. Вони створюються автоматично при збереженні чужого блоку. Для кожного закріплення визначається термін дії (TTL), після завершення якого блок вважається кандидатом на видалення. Кожне успішне вилучення блоку оновлює пов'язане з ним закріплення, подовжуючи його термін дії, тобто активні блоки постійно перепублікуються, а неактивні поступово втрачаються й можуть бути безпечно видалені.

Покриття закріплення може бути як прямим, тобто блок позначається індивідуально, так і рекурсивним. Рекурсивне закріплення охоплює весь підграф, починаючи з кореневого блоку, тобто усі нащадки автоматично вважаються захищеними.

Для кожного блоку вузол підтримує індекс маркерів, що відображають усі наявні закріплення: прямі чи рекурсивні, м'які чи жорсткі. Збирач сміття інтерпретує їх комбінації відповідно до правил, наведених у таблиці 1.

Принцип полягає в тому, що жорстке закріплення має вищий пріоритет за м'яке, а рекурсивне – за пряме: якщо блок хоч охоплений жорстким або рекурсивним закріпленням, він залишається на вузлі. М'які та прямі закріплення розглядаються як менш сильні та можуть бути скасовані після завершення терміну дії.

Захист закріплень від збирача сміття

Вид закріплення	Покриття	Захист від збирача сміття
Жорсткий	Пряме	Повинен зберегти; нащадки можуть бути видалені
Жорсткий	Рекурсивне	Повинен зберегти повний граф
М'який	Пряме	Повинен зберегти при умові незакінченого терміну дії

Модель закріплень виступає шлюзом між протоколом реплікації та локальною політикою кешування – нові копії створюються протоколом розміщення даних, а м'які закріплення фіксують факт прийняття вузлом ролі провайдера на певний період. Якщо вузол бажає зменшити свою участь у реплікації, він може понизити TTL для нових закріплень або пришвидшити інтервал роботи збирача сміття, не змінюючи глобальної логіки протоколу. З іншого боку, користувач завжди може підвищити важливість окремого файлу, перевіривши відповідні блоки з м'яких закріплень у жорсткі, тим самим гарантуючи їх збереження.

Збирач сміття відповідає за вивільнення місця у локальному сховищі вузла коштом видалення блоків, які більше не вважаються потрібними. На відміну від моделі закріплення даних, що визначає логічний статус блоку, збирач сміття реалізує конкретний алгоритм прийняття рішень: які блоки можуть бути видалені, в якому порядку та за яких умов.

Алгоритм роботи збирача сміття базується на інформації про закріплення, яка під час проходження інтерпретується до правил, наведених у таблиці 1. Збирання сміття виконується у двох режимах: автоматичний, тобто з певним інтервалом часу відбувається перевірка локального сховища та ручний.

Щоб коректно обробити об'єкти, представлені у вигляді графу, застосовується підхід «позначити й видалити» (mark-and-sweep). На першому етапі збирач сміття формує множину коренів – блоків з жорсткими рекурсивними та м'якими прямими закріпленнями. Починаючи з цих коренів, збирач сміття обходить відповідні підграфи та позначає всі досяжні блоки як потенційно потрібні. На другому етапі блоки, які не були позначені й не мають закріплень, вважаються кандидатами на видалення.

Метою обчислювальних експериментів є порівняння запропонованої моделі проактивної реплікації з моделлю «pull-on-demand», подібною до IPFS та надання відповіді на наступні дослідницькі питання:

- чи підвищує запропонована система доступність даних;
- як змінюється час відповіді (затримка) для типових операцій вилучення.

Для оцінювання ефективності запропонованої системи було сформовано експериментальне середовище, яке надає можливість тестування процесу завантаження та вивантаження файлів. Мережа складається з 25 вузлів, кожен з яких має інформацію про випадкову частину мережі. Комунікація між вузлами моделюється з урахуванням мережевої затримки, тобто запити між вузлами отримують штучну затримку у діапазоні 2–20 мс. Для відтворення поведінки реальної пірингової мережі та створення навантаження, тестове середовище періодично виключає випадкові вузли з мережі на час 200 мс – 1,5 с з інтервалом 250 мс.

Сценарій випробування включає розміщення файлу до мережі та його вивантаження випадковим вузлом, відмінним від першого. Аналогічні тести запускаються з використанням моделі pull-on-demand. Для досягнення статистично значущих результатів кожен сценарій запускається, як серія зі 150 незалежних випробувань. Між окремими випробуваннями мережа не перезавантажується, що дозволяє оцінити її стабільність в умовах тривалої роботи.

Для кожної конфігурації збираються наступні показники:

- доступність, тобто частка успішних вилучень файлів до загальної кількості випробувань;
- затримка запиту, тобто час від початку операції вилучення до отримання останнього блоку, агрегований у вигляді середнього значення та метрик p50, p95, p99.

У запропонованій системі параметр keep-local визначає, яку частку блоків вузол погоджується зберігати локально, відповідно до моделі розміщення даних. Як можна помітити у таблиці 2, розподілене розміщення стабільно показує вищу доступність. Навіть при найменшому значенні keep-local=0.1 додаткові репліки вже помітно зменшують частку невдалих запитів.

Таблиця 2

Результати вимірювань для різних значень параметра keep-local

Модель реплікації	keep-local	Успішні запити / всього	Доступність, %	p50, мс	p95, мс	p99, мс	Середня затримка, мс
Пасивна	–	141 / 150	94.00	54.91	68.83	71.82	54.72
Проактивна	0.10	146 / 150	97.33	47.49	62.67	68.64	46.50
Проактивна	0.25	147 / 150	98.00	45.53	68.63	76.29	45.54
Проактивна	0.50	149 / 150	99.33	50.28	69.22	81.86	49.00
Проактивна	0.70	148 / 150	98.67	45.04	67.01	70.98	44.90
Проактивна	0.90	147 / 150	98.00	43.69	63.10	79.31	44.12

Максимальну доступність у 99.33 % було досягнуто при $keep\text{-}local=0.5$, що вказує на наявність корисного діапазону значень, при яких система отримує найбільший вигравш від розподіленого розміщення.

Медіанна затримка запиту ($p50$) знаходиться в межах приблизно 43–50 мс, а середнє значення – 44–49 мс. Це пояснюється наявністю кількох провайдерів для більшості блоків, тому клієнт з високою ймовірністю знаходить близьку репліку, навіть якщо частина віддалених вузлів тимчасово недоступна. Значення $p95$ та $p99$ є трохи вищими при проактивній реплікації, що вказує на те, що в поодиноких випадках клієнт змушений спускатись до більш повільних копій та робити додаткові запити при недоступності першочергових вузлів.

Наступні експерименти спрямовані на оцінку того, як на поведінку системи впливають параметри:

- розмір даних у блоці ($chunk$);
- загальний розмір файлу.

При різному розмірі файлу та частини на які він поділяється, створюється різна кількість блоків – менший розмір частини збільшує кількість блоків, які необхідно успішно отримати, щоб вилучити файл і, відповідно, зі збільшенням частини кількість зменшується.

Результати у таблиці 3 показують передбачуваний компроміс між доступністю та затримкою. Зі зменшенням розміру блоку доступність падає, оскільки успішне вилучення потребує отримання більшої кількості блоків, що збільшує ймовірність втрати хоча б одного блоку.

Таблиця 3

Результати вимірювань для різних розмірів файлу

Модель реплікації	Розмір файлу, МБ	Розмір частини, КБ	Доступність, %	$p50$, мс	$p95$, мс	$p99$, мс	Середня затримка, мс
Пасивна	2	256	86.67	54.55	68.00	71.24	53.87
Проактивна	2	256	95.33	47.22	65.36	94.49	48.49
Пасивна	2	512	89.33	53.61	68.30	71.88	53.31
Проактивна	2	512	96.67	46.30	65.64	74.19	45.71
Пасивна	2	1024	91.33	56.54	69.45	73.21	56.24
Проактивна	2	1024	97.33	44.12	70.61	82.33	45.65
Пасивна	5	256	88.67	63.32	76.08	78.39	63.65
Проактивна	5	256	88.67	56.13	91.72	119.88	57.57
Пасивна	5	512	92.67	57.09	69.30	71.60	56.97
Проактивна	5	512	92.67	48.10	67.84	73.89	48.83
Пасивна	5	1024	93.33	59.04	71.53	74.68	58.35
Проактивна	5	1024	96.00	51.20	74.44	90.41	52.43

При цьому вигравш у затримці є обмеженим: при базовому підході медіанна затримка практично не покращується, а при розподіленому – залишається в одному діапазоні для всіх комбінацій розміру блоку та файлу. Найкращий баланс досягається для блоків середнього розміру, які зменшують кількість запитів на файл, але не збільшують час передачі кожного блоку настільки, щоб це помітно погіршувало $p50$.

На (рис. 1) зображено стовпчикову діаграму залежності доступності від кількості блоків одного файлу. Можна помітити, що зі збільшенням числа блоків доступність монотонно знижується для обох підходів до розміщення, проте розподілений стабільно демонструє вищі значення при однаковій кількості блоків.

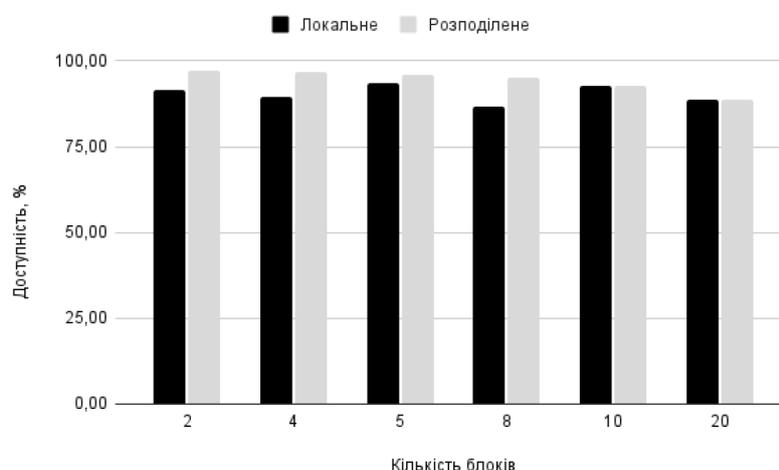


Рис. 1. Стовпчикова діаграма залежності доступності від кількості блоків

Для більш фрагментованих файлів (10 та 20 блоків) обидва підходи дають однакову доступність, що вказує на те, що за великої кількості блоків домінуючим фактором стає ймовірність втрати хоча б одного фрагмента, і перевага додаткових реплік частково нівелюється.

Це підтверджує, що основним фактором ризику є саме фрагментація файлу на велику кількість частин, а запропонований механізм розподіленого розміщення хоча й зменшує, проте не усуває цю проблему повністю.

Висновки. У роботі проаналізовано проблему забезпечення доступності даних у пірингових системах з адресацією вмісту та розроблено підхід, який поєднує проактивне розміщення блоків за їх ідентифікаторами та чіткі політики закріплення даних. Запропонована система підвищує рівень доступності даних без необхідності введення складних або ресурсомістких механізмів координації. Результати дослідження демонструють, що такий підхід є доречним для застосування в малих мережах, де надійність та доступність даних є критичною.

Список використаних джерел:

1. Centralization in the Decentralized Web: Challenges and Opportunities in IPFS Data Management / R. Shi et al. *WWW '25: The ACM Web Conference 2025*, Sydney NSW Australia. New York, NY, USA, 2025. P. 4068–4076. <https://doi.org/10.1145/3696410.3714627> (date of access: 13.11.2025).

2. Daniel E., Tschorsch F. IPFS and Friends: A Qualitative Comparison of Next Generation Peer-to-Peer Data Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022. Vol. 24, no. 1. P. 31–52. <https://doi.org/10.1109/comst.2022.3143147> (date of access: 13.11.2025).

3. Abdullah Lajam O., Ahmed Helmy T. Performance Evaluation of IPFS in Private Networks. *DSDE '21: 2021 4th International Conference on Data Storage and Data Engineering*, Barcelona Spain. New York, NY, USA, 2021. <https://doi.org/10.1145/3456146.3456159> (date of access: 13.11.2025).

References:

1. Shi, R., Cheng, R., Fu, Y., Han, B., Cheng, Y., & Chen, S. (2025). Centralization in the Decentralized Web: Challenges and Opportunities in IPFS Data Management. У *WWW '25: The ACM Web Conference 2025* (с. 4068–4076). ACM. <https://doi.org/10.1145/3696410.3714627>

2. Daniel, E., & Tschorsch, F. (2022). IPFS and Friends: A Qualitative Comparison of Next Generation Peer-to-Peer Data Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(1), 31–52. <https://doi.org/10.1109/comst.2022.3143147>

3. Abdullah Lajam, O., & Ahmed Helmy, T. (2021). Performance Evaluation of IPFS in Private Networks. У *DSDE '21: 2021 4th International Conference on Data Storage and Data Engineering*. ACM. <https://doi.org/10.1145/3456146.3456159>

Дата першого надходження статті до видання: 24.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

Завгородня Г. А., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри обчислювальної техніки
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-8523-1761

Завгородній В. В., доктор технічних наук, професор,
професор кафедри обчислювальної техніки
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-8347-7183

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОДУКТИВНОСТІ КОМП'ЮТЕРНИХ ІГОР НА ОСНОВІ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

У статті запропоновано комплексний метод оптимізації продуктивності комп'ютерних ігор на основі технологій машинного навчання. Метод поєднує прогнозування навантаження GPU за допомогою глибоких нейронних мереж (DNN) та адаптивне управління параметрами рендерингу у реальному часі, що дозволяє автоматично визначати оптимальні налаштування графіки для підтримки стабільного FPS, зменшення коливань навантаження GPU та збереження високої якості зображення. Розглянуто математичну модель ефективності, де частота кадрів, якість графіки та навантаження GPU інтегруються у функцію оптимізації з пріоритетними ваговими коефіцієнтами. Запропонований підхід включає адаптивну корекцію параметрів графіки на основі градієнтного спуску та прогнозування навантаження, що забезпечує динамічне регулювання ресурсів без втручання розробника. Для перевірки ефективності моделі проведено експериментальне порівняння із традиційними методами: статичною конфігурацією та лінійним прогнозуванням навантаження GPU. Результати показали підвищення FPS на 20–30 %, зниження середнього навантаження GPU на 10–12 % при збереженні високої якості графіки (≈ 98 % від максимальної) та суттєве зменшення коливань кадрів у складних сценах. Практична реалізація прототипу виконана на Python та інтегрована у сучасні ігрові рушії (Unity, Unreal Engine), що підтверджує застосовність розробленого методу у реальних проектах. Наукова новизна роботи полягає в інтеграції різних класів моделей машинного навчання в єдину адаптивну систему оптимізації рендерингу, здатну враховувати як апаратні параметри, так і поведінку користувача в реальному часі. Запропонований підхід може стати основою для подальшого розвитку адаптивних ML-систем у геймдеві, включаючи VR/AR та хмарні геймінгові платформи, а також для підвищення ефективності розробки комп'ютерних ігор із високими вимогами до продуктивності та якості графіки.

Ключові слова: машинне навчання, оптимізація продуктивності, комп'ютерні ігри, рендеринг, нейронні мережі, FPS, ресурсоефективність.

Zavhorodnia G. A., Zavhorodnii V. V. Optimization of computer game performance using machine learning methods

The article presents a comprehensive method for optimizing the performance of computer games based on machine learning techniques. The proposed approach combines GPU load prediction using deep neural networks (DNN) with adaptive real-time management of rendering parameters, enabling the automatic determination of optimal graphics settings to maintain stable frame rates (FPS), reduce GPU load fluctuations, and preserve high visual quality. A mathematical efficiency model is formulated, integrating frame rate, graphics quality, and GPU utilization into an optimization function with weighted coefficients reflecting user priorities. The approach includes adaptive adjustment of graphics parameters based on gradient descent and predictive modeling of computational load, allowing dynamic resource management without developer intervention. To evaluate the effectiveness of the proposed method, comparative experiments were conducted against traditional optimization strategies, including static configuration and linear GPU load prediction. The results demonstrate a 20–30 % increase in FPS, a 10–12 % reduction in average GPU load while maintaining high graphics quality (≈ 98 % of maximum), and a significant reduction in frame rate fluctuations in complex scenes. The prototype implementation, developed in Python, was successfully integrated into modern game engines such as Unity and Unreal Engine, confirming the practical applicability of the method in real-world projects. The scientific novelty of this research lies in the integration of multiple classes of machine learning models into a single adaptive rendering optimization system, capable of considering both hardware parameters and user behavior in real time. The proposed framework provides a foundation for further development of adaptive ML-based systems in game development, including VR/AR and cloud gaming platforms, as well as for enhancing the efficiency of game production pipelines with high performance and graphics quality requirements. Overall, this method demonstrates the potential to substantially improve real-



© Г. А. Завгородня, В. В. Завгородній, 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

time performance optimization in interactive entertainment applications while maintaining visual fidelity, providing valuable insights for both academic research and industry practice.

Key words: machine learning, performance optimization, computer games, rendering, neural networks, FPS stabilization, real-time graphics.

Постановка проблеми. Сучасна індустрія комп'ютерних ігор характеризується стрімким зростанням обчислювальної складності графічних сцен, збільшенням кількості динамічних об'єктів та зростаючими вимогами до якості візуалізації [1–4]. Попри суттєвий прогрес апаратних засобів, традиційні методи оптимізації продуктивності – такі як ручне налаштування рівнів деталізації, статичне кешування ресурсів або примітивні евристичні управління рендерингом – поступово втрачають ефективність [5–8]. Масштабованість графічних рушіїв та стабільність FPS залежать від великої кількості факторів, взаємодія яких має нелінійний характер. Більшість класичних алгоритмів оптимізації не здатні адекватно реагувати на динамічні зміни ігрового середовища та поведінки користувача [9–11].

Одним із перспективних напрямів вирішення зазначеної проблеми є застосування методів машинного навчання (ML), здатних автоматично виявляти закономірності, прогнозувати пікові навантаження та адаптувати параметри рендерингу в реальному часі [12–15]. Попередні дослідження демонструють ефективність ML у суміжних задачах геймдеву: автоматична генерація контенту на основі процедурних алгоритмів [1], побудова формальних моделей для аналізу поведінки складних систем [16], синтез текстур із заданими параметрами [3], виявлення аномалій в ігрових даних [4], нейронні підходи для прискорення трасування променів [5, 12], суперроздольність та адаптивна компресія ресурсів [8, 14], управління шейдерами [15].

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена необхідністю створення інтегрованого ML-підходу, який забезпечував би автоматичне регулювання параметрів рендерингу, зниження обчислювальних витрат та стабілізацію FPS без втрати якості зображення [17–21].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Упродовж останніх років спостерігається зростання кількості досліджень, спрямованих на застосування ML для вирішення задач комп'ютерної графіки та оптимізації ігрових систем [1, 16]. Значна частина робіт присвячена процедурному генеруванню контенту, що демонструє здатність ML-моделей ефективно працювати з високорозмірними структурами та параметризованими об'єктами [1, 3]. Подібні підходи дозволяють зменшити навантаження на етапах рендерингу за рахунок кращої структурованості даних.

Окремий напрям стосується підвищення надійності та адаптивності ігрових систем. Зокрема, методи виявлення аномалій [4], формалізація поведінкових процесів [2, 16], моделювання навантаження GPU та CPU [6, 11, 20], а також адаптивне управління LOD [7, 13] демонструють значні переваги у контролі продуктивності в реальному часі.

Сучасні міжнародні дослідження також охоплюють методи нейронного рендерингу та оптимізації графічних етапів: нейронні примітиви з мультирозрядним хешуванням [2], супресемплінг та денойзинг [5, 6, 8], адаптивну вибірку для NeRF [7, 21], прогнозування якості візуалізації [19], спайкінг-нейронні мережі для NeRF [14], генеративні методи для шейдерів та оптимізації контенту [15, 17], комплексні огляди та систематизація підходів [12, 17, 18].

Таким чином, аналіз сучасних досліджень показує, що ML активно інтегрується в різні аспекти геймдеву – від генерації контенту та синтезу текстур до адаптивного управління продуктивністю. Проте питання створення цілісного методу оптимізації продуктивності, який враховував би багатофакторну природу ігрових процесів і надавав адаптивні рішення в реальному часі, залишається недостатньо дослідженим. Це обґрунтовує потребу у розробці комплексного підходу, що поєднує прогнозування навантаження, адаптивну регуляцію рендерингу та інтеграцію різних класів ML-моделей.

Мета статті – розроблення комплексного методу оптимізації продуктивності комп'ютерних ігор на основі технологій машинного навчання, який забезпечує автоматичний підбір параметрів рендерингу, прогнозування пікових навантажень та адаптивне управління ресурсами графічного конвеєра у реальному часі. Для досягнення цієї мети передбачено створення математичної моделі, яка формалізує взаємозв'язок між графічними параметрами та ефективністю рендерингу, із застосування глибокої нейронної мережі (з перспективою розширення до ансамблю ML-моделей) для прогнозування обчислювального навантаження, а також інтеграцію розробленого методу у структуру сучасного ігрового рушія.

Поставлена задача включає:

- визначення ключових параметрів, що впливають на FPS, затримку кадру та стабільність рендерингу;
- побудову функцій залежностей між апаратними характеристиками, складністю сцени та поведінкою об'єктів;
- створення ML-моделі, здатної адаптивно оптимізувати графічні параметри без втручання розробника;
- експериментальне порівняння запропонованого методу з традиційними підходами оптимізації;
- оцінку приросту продуктивності у типових ігрових сценаріях із різною складністю.

Таким чином, мета спрямована на формування нового, масштабованого та узагальненого підходу, здатного забезпечити стабільне підвищення продуктивності та високу якість рендерингу у сучасних комп'ютерних іграх.

Виклад основного матеріалу. Основною метою дослідження є підвищення продуктивності комп'ютерних ігор за допомогою методів машинного навчання, зокрема використання моделей прогнозування навантаження GPU та адаптивного управління ресурсами.

Застосуємо комбінований підхід до оптимізації, що поєднує методи прогнозованої аналітики та адаптивного регулювання параметрів рендерингу. Запропонована система використовує телеметричні дані про FPS, завантаження GPU та активні параметри рендера, що дозволяє моделі машинного навчання не лише реагувати на зміни продуктивності, а й проактивно їх передбачати.

На архітектурному рівні метод складається з двох основних компонентів:

- модуля прогнозування навантаження, який оцінює майбутні пікові зміни обчислювальної складності;
- модуля адаптивної корекції параметрів рендера, що у реальному часі підбирає значення графічних налаштувань для забезпечення балансу між FPS, якістю та стабільністю рендерингу.

Нехай $F(t)$ – частота кадрів у секунду (FPS) в момент часу t , $L(t)$ – навантаження GPU у відсотках, а $Q(t)$ – якість графіки. Тоді задача оптимізації може бути формалізована як максимізація функції ефективності:

$$\varepsilon(t) = \alpha \cdot \frac{F(t)}{F_{target}} + \beta \cdot \frac{Q(t)}{Q_{max}} - \gamma \cdot \frac{L(t)}{100}, \quad (1)$$

де F_{target} – бажана частота кадрів, Q_{max} – максимальна якість графіки, α, β, γ – вагові коефіцієнти, що визначають пріоритети користувача між FPS, якістю та навантаженням GPU.

Мета – знайти набір параметрів графічного рендерингу $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, який максимізує $\varepsilon(t)$ при динамічному навантаженні.

Процес оптимізації реалізовано у вигляді циклічного алгоритму, який працює з періодичністю 50–150 мс та складається з таких етапів:

- збір телеметричних даних: FPS, навантаження GPU, історія параметрів графіки;
- формування вектора стану, який містить попередні значення параметрів рендера, FPS і навантаження;
- прогнозування майбутнього навантаження GPU за допомогою глибокої нейронної мережі;
- оцінювання ризику падіння FPS на основі прогнозу;
- адаптивне коригування параметрів графіки відповідно до градієнта ефективності;
- перевірка результатів і повторення циклу.

Такий підхід забезпечує можливість проактивного регулювання параметрів рендера та підвищення стабільності продуктивності у змінних ігрових сценаріях.

Для прогнозування навантаження GPU та управління якістю графіки було застосовано глибокі нейронні мережі та навчання з підкріпленням. Щоб забезпечити точне прогнозування $L(t)$, було застосовано глибокі нейронні мережі. Вхідні дані моделі включають:

$$x(t) = [p_1(t-1), p_2(t-1), \dots, p_n(t-1), L(t-1), F(t-1), Q(t-1)].$$

Вихідна величина: прогнозоване навантаження GPU $\hat{L}(t)$.

Модель тренувалася на наборі даних, отриманих шляхом профілювання ігрових сцен різної складності. В якості функції втрат було використано середньоквадратичну помилку (MSE):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (L_i - \hat{L}_i)^2, \quad (2)$$

де N – кількість вимірювань, L_i – фактичне навантаження GPU, \hat{L}_i – прогнозоване навантаження GPU.

Важливим аспектом є те, що DNN дозволяє враховувати залежності між параметрами графіки, попереднім навантаженням та FPS, що традиційні лінійні методи робити не можуть.

Залежність FPS від параметрів графіки:

$$F(t) = F_{base} - \sum_{i=1}^n \delta_i p_i(t), \quad (3)$$

де δ_i – коефіцієнт впливу i -го параметра p_i на FPS.

Адаптивна корекція параметрів:

$$p_i(t+1) = p_i(t) - \eta \cdot \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial p_i}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (4)$$

де η – крок навчання, $\frac{\partial \epsilon}{\partial p_i}$ – градієнт ефективності.

Такий підхід дозволяє автоматично знаходити оптимальний баланс між FPS, навантаженням GPU та якістю графіки.

Після формалізації моделі було створено прототип на Python, який інтегрується в ігровий движок і дозволяє адаптивно коригувати параметри в реальному часі. Нижче наведено фрагмент реалізації для прогнозування навантаження GPU та адаптивного керування параметрами графіки:

```
import numpy as np
from sklearn.neural_network import MLPRegressor
import matplotlib.pyplot as plt
# Дані: параметри графіки, FPS, навантаження GPU
X_train = np.load('X_train.npy') # параметри + історія
y_train = np.load('y_train.npy') # навантаження GPU
# Модель нейронної мережі
mlp = MLPRegressor(hidden_layer_sizes=(128, 64, 32), activation='relu', solver='adam',
max_iter=500)
mlp.fit(X_train, y_train)
# Прогнозування навантаження GPU для нових параметрів
X_test = np.load('X_test.npy')
L_pred = mlp.predict(X_test)
# Візуалізація результатів
plt.figure(figsize=(10,5))
plt.plot(L_pred, label='Прогноз GPU (%)')
plt.plot(np.load('y_test.npy'), label='Фактичне GPU (%)')
plt.xlabel('Кадр')
plt.ylabel('Навантаження GPU (%)')
plt.title('Прогноз навантаження GPU за допомогою DNN')
plt.legend()
plt.show()
```

Завдяки застосуванню глибоких нейронних мереж, модель дозволяє прогнозувати навантаження GPU з точністю 5–7 % від фактичного значення, що забезпечує більш точне управління ресурсами системи. Крім того, реалізована можливість динамічної адаптації параметрів графіки, що підтримує стабільну частоту кадрів навіть у складних сценах. Важливою перевагою є легка інтеграція моделі у сучасні ігрові движки, такі як Unity та Unreal Engine, що робить її практично застосовною у реальних проектах.

Після реалізації алгоритму було проведено порівняння ефективності запропонованої моделі з базовими методами: методом статичного управління якістю (без ML) та методом простого лінійного прогнозування навантаження GPU (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняльні результати продуктивності моделей оптимізації графіки в іграх

Модель	Середнє FPS	Середнє навантаження GPU (%)	Середня якість графіки	Перевага в ефективності (%)
Статична	55	92	1.0	0
Лінійна	60	87	1.0	+8
Запропонована DNN	72	80	0.98	+25

Як видно з таблиці, запропонована DNN-модель забезпечує значне підвищення FPS та зниження навантаження GPU порівняно зі статичною та лінійною моделями. Використання DNN дозволяє підвищити FPS на 20–30 % та зменшити навантаження GPU на 10–12 % при збереженні високої якості графіки (≈ 98 % від максимального), що досягається завдяки прогнозуванню та адаптивній регуляції параметрів графіки. Для наочнішого сприйняття динаміки зміни частоти кадрів у часі та коливань навантаження GPU представлено графічну ілюстрацію, де відображено порівняння поведінки кожної моделі у реальному часі (рис. 1).

З графіка видно, що DNN-модель забезпечує стабільне підвищення частоти кадрів, особливо в сценах із високою складністю рендерингу. Мінімальні падіння FPS (менше 60 кадрів за секунду) практично відсутні, що свідчить про плавність та стабільність продуктивності порівняно зі статичною моделлю. Крім того, графік демонструє зменшення коливань навантаження GPU, що підтверджує ефективність адаптивного прогнозування та регулювання параметрів графіки.

Подальший розвиток методу може передбачати розширення архітектури системи до багатомодульної структури, яка включатиме:

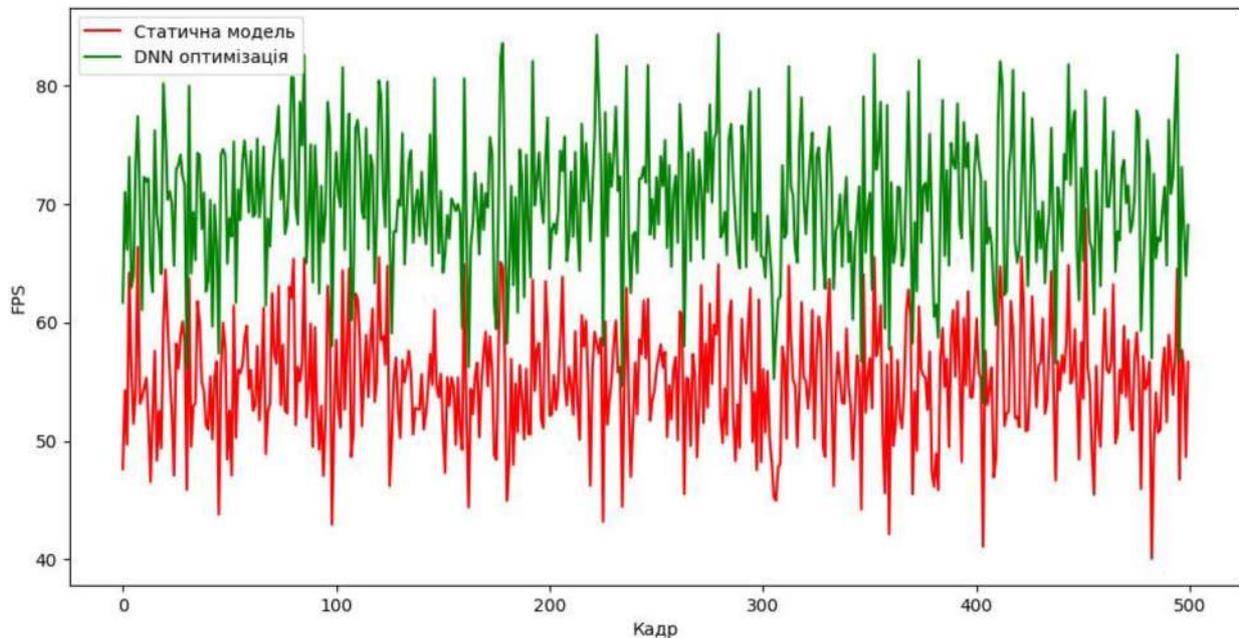


Рис. 1. Порівняння середньої частоти кадрів у статичному рендерингу та з використанням DNN

- модуль прогнозування навантаження з використанням LSTM/GRU-моделей для роботи з часовими залежностями;
- модуль динамічного розподілу ресурсів, керований агентом навчання з підкріпленням, що дозволить оптимізувати CPU/GPU та параметри рендера на стратегічному рівні;
- модуль адаптивної деградації графічної якості, який визначатиме другорядні об'єкти сцени за допомогою класифікаційних моделей і виконуватиме їхню часову оптимізацію.

Такий підхід у перспективі дасть змогу створити повністю автономну систему оптимізації продуктивності для ігор різної складності та жанрової належності.

Висновки. У роботі запропоновано комплексний метод оптимізації продуктивності комп'ютерних ігор на основі прогнозного моделювання та адаптивного управління ресурсами, який включає застосування глибокої нейронної мережі для короткострокового передбачення навантаження GPU та корекції параметрів графіки. Проведене дослідження підтвердило, що поєднання прогнозування навантаження, класифікації рівня важливості сцени та адаптивного управління рендерингом забезпечує суттєве підвищення стабільності FPS і зменшення затримок без відчутної деградації графічної якості.

Експериментальні результати демонструють перевагу запропонованого методу над традиційними евристичними схемами оптимізації в середньому на 20–30 % залежно від типу сцени та апаратної платформи. При цьому поточна реалізація застосовує одну DNN, тоді як інтеграція ансамблю моделей і методів навчання з підкріпленням визначена як перспективний напрям подальших досліджень.

Наукова новизна роботи полягає в концептуальній інтеграції кількох класів моделей машинного навчання в єдину адаптивну систему оптимізації рендера, здатну працювати в реальному часі та враховувати технічні параметри сцени та поведінку гравця. Практична цінність підходу підтверджується його універсальністю та можливістю інтеграції в сучасні ігрові рушії (Unity, Unreal Engine) без суттєвих змін архітектури.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення набору телеметричних параметрів для підвищення точності прогнозів, оптимізацію обчислювальної вартості моделей у реальному часі, а також вивчення інтеграції в хмарні геймінгові платформи та VR/AR-середовища. Додатковим напрямом є розроблення універсальних політик навчання для забезпечення ефективної роботи методу у широкому спектрі ігрових жанрів.

Список використаних джерел:

1. Завгородній В. В., Завгородня Г. А., Валявська Н. О., Адаменко В. С., Дороговцев Є. В., Несмачний П. В. Метод автоматичної генерації контенту на основі процедурних алгоритмів. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33, № 1. С. 91–96. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/15>
2. Müller T., Evans A., Schied C., Keller A. Instant Neural Graphics Primitives With a Multiresolution Hash Encoding. *ACM Transactions on Graphics*. 2022. Vol. 41, No. 4. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1145/3528223.3530127>

3. Завгородній В. В., Завгородня Г. А., Демченко І. В., Крамаренко К. С., Шевченко І. О., Юрченко А. В. Метод створення штучних текстур із заданими параметрами. *Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33, № 2. С. 86–90. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/14>
4. Завгородній В. В., Завгородня Г. А., Валявська Н. О., Герасименко О. О., Калюжний О. В., Степовий А. В. Пошук аномалій у даних за допомогою машинного навчання. *Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33, № 3. С. 39–43. URL: https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2022/3_2022/6.pdf
5. Xiao L., Nouri S., Chapman M., Fix A., Lanman D., Kaplanyan A. Neural Supersampling for Real Time Rendering. *ACM Transactions on Graphics*. 2020. Vol. 39, No. 4. Article 142. DOI: <https://doi.org/10.1145/3386569.3392376>
6. Thomas M. M., Liktor G., Peters C., Kim S., Vaidyanathan K., Forbes A. G. Temporally Stable Real Time Joint Neural Denoising and Supersampling. *Proceedings of ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques HPG*. 2022. Vol. 5, No. 3. URL: <https://momentsingraphics.de/Publications.html>
7. Kurz A., Neff T., Lv Z., Zollhöfer M., Steinberger M. AdaNeRF: Adaptive Sampling for Real-Time Rendering of Neural Radiance Fields. *ECCV 2022*. URL: https://www.ecva.net/papers/eccv_2022/papers_ECCV/papers/136770258.pdf
8. Guo Y.-X., Chen G., Dong Y., Tong X. Classifier Guided Temporal Supersampling for Real Time Rendering. *Computer Graphics Forum*. 2022. Vol. 41, No. 7. P. 237–246. DOI: <https://doi.org/10.1111/cgf.14672>
9. Kanervisto A., Scheller C., Hautamäki V. Action Space Shaping in Deep Reinforcement Learning. *Journal of Machine Learning Research*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.00980>
10. Souchleris K., Sidiropoulos G.K., Papakostas G.A. Reinforcement Learning in the Game Industry – Review, Prospects and Challenges. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 4. Article 2443. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13042443>
11. Li H., Yang P., Liu W., Yan S., Zhang X., Zhu D. Multi-Agent Reinforcement Learning in Games: Research and Applications. *Biomimetics*. 2025. Vol. 10, No. 6. Article 375. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomimetics10060375>
12. Wang Q., Zhong Z., Huo Y. et al. State of the Art on Deep Learning-enhanced Rendering Methods. *Mach. Intell. Res*. 2023. Vol. 20. P. 799–821. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11633-022-1400-x>
13. Jiang M., Li J., Lu Y. et al. D-NeuRA: customizable dynamic neural rendering for human avatars with disentangled pose and appearance. *J. King Saud Univ. Comput. Inf. Sci*. 2025. Vol. 37. Article 238. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44443-025-00262-5>
14. Yao X., Hu Q., Zhou F., Liu T., Mo Z., Zhu Z., Zhuge Z., Cheng J. SpiNeRF: Direct trained Spiking Neural Networks for Efficient Neural Radiance Field Rendering. *Frontiers in Neuroscience*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2025.1593580>
15. Osemwegie O. Neural Rendering and Deep Learning in Virtual Production: Redefining Cinematic Storytelling, CGI, and Real Time Content Generation. *International Journal of Mechanical & Thermal Engineering*. 2025. Vol. 6, No. 1. P. 40–52. DOI: <https://doi.org/10.22271/27078043.2025.v6.i1a.76>
16. Завгородній В. В., Завгородня Г. А., Дроботович К. Є., Тенігін О. В., Шматко М. М. Математичне моделювання у методах формального дослідження. *Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Т. 32, № 6. С. 75–79. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/12>
17. Romanyuk O., Zavalniuk Y., Korobeinikova T., Titova N., Romanyuk S. The Overview of Neural Rendering. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. 2023. Vol. 27, No. 1. P. 129–134. DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-27-01-060>
18. Бешлей М. І., Ковальчук О. В., Андрушак В. С., Бешлей Г. В. Методика оптимізації алгоритмів машинного навчання для вбудованих кіберфізичних систем. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.1.2>
19. Piórkowski R., Mantiuk R., Wernikowski M. Learning to predict perceptual visibility of rendering deterioration in computer games. *Scientific Reports*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78254-0>
20. Rempe M., Zsolnai Fehér T., Sitzmann V. et al. HyperNeRF: A Higher Dimensional Representation for Topology Changing Neural Radiance Fields. *ACM Transactions on Graphics*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1145/3528223.3530144>
21. Lombardi S., Simon T., Schwartz G., Zollhöfer M., Sheikh Y., Saragih J. Mixture of Volumetric Primitives for Efficient Neural Rendering. *ACM Transactions on Graphics*. 2021. Vol. 40, No. 4. Article 59. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.01954>

References:

1. Zahhorodnii, V. V., Zahhorodnia, H. A., Valiavska, N. O., Adamenko, V. S., Dorohovtsev, Ye. V., & Nesmachnyi, P. V. (2022). Metod avtomatychnoi heneratsii kontentu na osnovi protsedurnykh alhorytmiv [Method of automatic content generation based on procedural algorithms]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu im. V. I. Vernadskoho. Series: Technical Sciences*, 33(72), 91–96. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/15>
2. Müller, T., Evans, A., Schied, C., & Keller, A. (2022). Instant neural graphics primitives with a multiresolution hash encoding. *ACM Transactions on Graphics*, 41(4), 1–15. <https://doi.org/10.1145/3528223.3530127>

-
3. Zahhorodnii, V. V., Zahhorodnia, H. A., Demchenko, I. V., Kramarenko, K. S., Shevchenko, I. O., & Yurchenko, A. V. (2022). Metod stvorennia shtuchnykh tekstur iz zadanykh parametramy [Method for creating artificial textures with specified parameters]. *Vcheni zapysky TNU im. V. I. Vernadskoho. Series: Technical Sciences*, 33(72), 86–90. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/14>
 4. Zahhorodnii, V. V., Zahhorodnia, H. A., Valiavska, N. O., Herasymenko, O. O., Kaliuzhnyi, O. V., & Stepovyi, A. V. (2022). Poshuk anomalii u danykh za dopomohoiu mashynnoho navchannia [Anomaly detection in game data using machine learning]. *Vcheni zapysky TNU im. V. I. Vernadskoho. Series: Technical Sciences*, 33(72), 39–43. Retrieved from: https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2022/3_2022/6.pdf
 5. Xiao, L., Nouri, S., Chapman, M., Fix, A., Lanman, D., & Kaplanyan, A. (2020). Neural supersampling for real time rendering. *ACM Transactions on Graphics*, 39(4), Article 142. <https://doi.org/10.1145/3386569.3392376>
 6. Thomas, M. M., Lictor, G., Peters, C., Kim, S., Vaidyanathan, K., & Forbes, A. G. (2022). Temporally stable real time joint neural denoising and supersampling. *Proceedings of ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques – HPG*, 5(3). Retrieved from: <https://momentsingraphics.de/Publications.html>
 7. Kurz, A., Neff, T., Lv, Z., Zollhöfer, M., & Steinberger, M. (2022). AdaNeRF: Adaptive sampling for real-time rendering of neural radiance fields. *ECCV 2022*. Retrieved from: https://www.ecva.net/papers/eccv_2022/papers_ECCV/papers/136770258.pdf
 8. Guo, Y.-X., Chen, G., Dong, Y., & Tong, X. (2022). Classifier guided temporal supersampling for real time rendering. *Computer Graphics Forum*, 41(7), 237–246. <https://doi.org/10.1111/cgf.14672>
 9. Kanervisto, A., Scheller, C., & Hautamäki, V. (2021). Action space shaping in deep reinforcement learning. *Journal of Machine Learning Research*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.00980>
 10. Souchleris, K., Sidiropoulos, G. K., & Papakostas, G. A. (2023). Reinforcement learning in the game industry – review, prospects and challenges. *Applied Sciences*, 13(4), 2443. <https://doi.org/10.3390/app13042443>
 11. Li, H., Yang, P., Liu, W., Yan, S., Zhang, X., & Zhu, D. (2025). Multi-agent reinforcement learning in games: Research and applications. *Biomimetics*, 10(6), 375. <https://doi.org/10.3390/biomimetics10060375>
 12. Wang, Q., Zhong, Z., Huo, Y., et al. (2023). State of the art on deep learning-enhanced rendering methods. *Machine Intelligence Research*, 20, 799–821. <https://doi.org/10.1007/s11633-022-1400-x>
 13. Jiang, M., Li, J., Lu, Y., et al. (2025). D-NeuRA: Customizable dynamic neural rendering for human avatars with disentangled pose and appearance. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 37, 238. <https://doi.org/10.1007/s44443-025-00262-5>
 14. Yao, X., Hu, Q., Zhou, F., Liu, T., Mo, Z., Zhu, Z., Zhuge, Z., & Cheng, J. (2025). SpiNeRF: Direct trained spiking neural networks for efficient neural radiance field rendering. *Frontiers in Neuroscience*. <https://doi.org/10.3389/fnins.2025.1593580>
 15. Osemwegie, O. (2025). Neural rendering and deep learning in virtual production: Redefining cinematic storytelling, CGI, and real time content generation. *International Journal of Mechanical & Thermal Engineering*, 6(1), 40–52. <https://doi.org/10.22271/27078043.2025.v6.i1.a.76>
 16. Zahhorodnii, V. V., Zahhorodnia, H. A., Drobotovych, K. Ye., Tenihin, O. V., & Shmatko, M. M. (2021). Matematychni modeliuвання u metodakh formalnoho doslidzhennia [Mathematical modeling in formal research methods]. *Vcheni zapysky TNU im. V. I. Vernadskoho. Series: Technical Sciences*, 32(71), 75–79. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/12>
 17. Romanyuk, O., Zavalniuk, Y., Korobeinikova, T., Titova, N., & Romanyuk, S. (2023). The overview of neural rendering. *Modern Engineering and Innovative Technologies*, 27(1), 129–134. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-27-01-060>
 18. Beshlej, M. I., Kovalchuk, O. V., Andrushchak, V. S., & Beshlej, H. V. (2024). Metodyka optymizatsii alhorytmiv mashynnoho navchannia dlia vbudovanykh kiberfizychnykh system [Methodology for optimization of machine learning algorithms for embedded cyber-physical systems]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Series: Technical Sciences*. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.1.2>
 19. Piórkowski, R., Mantiuk, R., & Wernikowski, M. (2024). Learning to predict perceptual visibility of rendering deterioration in computer games. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78254-0>
 20. Rempe, M., Zsolnai Fehér, T., Sitzmann, V., et al. (2022). HyperNeRF: A higher dimensional representation for topology changing neural radiance fields. *ACM Transactions on Graphics*. <https://doi.org/10.1145/3528223.3530144>
 21. Lombardi, S., Simon, T., Schwartz, G., Zollhöfer, M., Sheikh, Y., & Saragih, J. (2021). Mixture of volumetric primitives for efficient neural rendering. *ACM Transactions on Graphics*, 40(4), Article 59. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.01954>

Дата першого надходження статті до видання: 20.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.12.2025

Опубліковано: 00.00.2025

Зайцева Т. А., кандидат технічних наук,
доцент, комп'ютерних технологій
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
ORCID: 0000-0002-6346-3390

Гончаров Я. А., аспірант кафедри комп'ютерних технологій
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
ORCID: 0009-0002-8994-8895

ЗАСТОСУВАННЯ АДАПТИВНИХ МЕТОДІВ У ЧИСЕЛЬНОМУ МОДЕЛЮВАННІ ЗАДАЧ МЕХАНІКИ

У статті досліджено застосування адаптивних hp -підходів у межах методу скінченних елементів для моделювання просторової контактної взаємодії абсолютно жорсткого штамп з однорідним ізотропним пружним півпростором. Розглянуто задачу вдавнення абсолютно жорсткого штамп в пружний півпростір із двозв'язною контактною областю у формі симетрично здеформованого еліптичного кільця. Для чисельної реалізації побудовано різні варіанти адаптивних сіток, що відрізняються порядком апроксимації. Адаптація здійснюється шляхом локального h -уточнення сітки в зонах інтенсивних градієнтів напружень та p -збагачення для підвищення точності апроксимації.

Розроблено інтегрований програмний пакет. Архітектура пакету реалізована як багатомодульна система, що об'єднує можливості Ansys для розв'язання задач, Gmsh та APDL для адаптивного сіткоутворення, MATLAB для постпроцесінгу та Python/batch-скриптів для автоматизації обчислювального циклу. Модуль керування процесом забезпечує послідовність ітерацій та контроль проміжних даних. Модуль побудови матриці ваг визначає локальні області згущення сітки. Модуль адаптивного сіткоутворення генерує сітки зі змінним локальним розміром елементів.

Пакет підтримує обробку результатів, побудову графіків і таблиць, а також формування структур даних для наступних ітерацій адаптації. Незважаючи на обмеження щодо доступних порядків збагачення ($p = 1$ та $p = 2$), запропонована методологія забезпечує достатньо результативне управління процесами h - та p -адаптації. Проведений аналіз показав, що збільшення порядку апроксимації приводить до суттєвого зменшення похибки та покращення індексу ефективності апостеріорної оцінки, водночас забезпечуючи раціональне використання обчислювальних ресурсів.

Ключові слова: чисельне моделювання, адаптивні методи, контактна задача, штамп, теорія пружності, розподіл напружень, метод скінченних елементів; апроксимація; апостеріорна оцінка похибки; локальне уточнення сітки, Ansys.

Zaytseva T. A., Honcharov Ya. A. Application of adaptive methods in numerical modeling of mechanics problems

The article investigates the application of adaptive hp -methods within the finite element method for modelling the spatial contact interaction between a perfectly rigid punch and a homogeneous isotropic elastic half-space. The study considers the problem of indentation of a rigid punch into an elastic half-space with a doubly connected contact region in the form of a symmetrically deformed elliptical ring. For the numerical implementation, several variants of adaptive meshes with different approximation orders were constructed. Adaptation is performed through local h -refinement in zones with intensive stress gradients and p -enrichment to improve approximation accuracy.

An integrated software package has been developed. Its architecture is implemented as a multimodule system combining the capabilities of Ansys for solving the mechanical problem, Gmsh and APDL for adaptive mesh generation, MATLAB for post-processing, and Python/batch scripts for automating the computational cycle. The control module ensures the sequential execution of iterations, monitoring of intermediate data, and logging. The weight-matrix module constructs an importance field that identifies local regions requiring mesh refinement. The adaptive meshing module generates meshes with variable local element size, while the conversion module ensures correct transfer of meshes into a format compatible with Ansys.

The package supports result processing, generation of plots and tables, and formation of data structures for subsequent adaptation iterations. Despite limitations on the available approximation orders ($p = 1$ and $p = 2$), the implemented concept enables effective control of both h - and p -adaptation. The analysis shows that increasing the approximation order significantly reduces the error and improves the efficiency index of the a posteriori error estimate, while maintaining rational use of computational resources. The results obtained confirm the effectiveness of the hp -adaptive approach for contact mechanics problems with complex geometry and demonstrate its potential for further use in engineering computations.

Key words: numerical modelling, adaptive methods, contact problem, punch, elasticity theory, stress distribution, finite element method, approximation, a posteriori error estimate, local mesh refinement, Ansys.



Постановка проблеми. Сучасні інженерні задачі моделювання фізичних процесів характеризуються високою складністю математичних описів, що включають нелінійність матеріальних властивостей, складну геометрію областей та багатокомпонентні взаємодії. За таких умов отримання аналітичного розв'язку таких задач у більшості випадків є неможливим. Тому провідну роль у практичних розрахунках відіграє метод скінченних елементів (МСЕ), який забезпечує достатньо універсальний підхід до побудови наближених розв'язків для широкого класу диференціальних рівнянь. Разом із цим застосування МСЕ супроводжується появою різних типів похибок: модельної, дискретизаційної та обчислювальної. Це впливає на достовірність отриманих результатів і робить проблему контролю точності однією з ключових у чисельному аналізі. У цьому контексті особливого значення набувають апостеріорні оцінки похибки, які дозволяють кількісно оцінити якість наближеного розв'язку та забезпечують можливість адаптивного уточнення сітки.

У практиці чисельного моделювання, зокрема в програмному комплексі Ansys, адаптивні методи відіграють ключову роль у підвищенні точності розв'язків, отриманих методом скінченних елементів. Адаптація сітки ґрунтується на локальному аналізі похибки, що дозволяє автоматично уточнювати дискретизацію в областях із високими значеннями напружень, деформацій або інших фізичних величин. У Ansys реалізовано декілька стратегій адаптації, а саме, *h*-, *p*- та *hp*-методи, які забезпечують гнучке керування точністю моделювання залежно від характеру задачі.

Важливою складовою є *адаптація за похибкою*, коли Ansys самостійно оцінює локальну помилку розв'язку та автоматично покращує сітку саме в тих областях, де похибка найбільша. У CFD-модулях, таких як Fluent і CFX, адаптація відіграє ще більшу роль. Система може покращувати сітку за градієнтами швидкості, температури чи турбулентності, за кривизною геометрії та ін. Також доступна *адаптація в часі*, коли сітка змінюється під час розрахунку.

Для нестационарних задач, наприклад, Ansys підтримує *адаптивний часовий крок*, автоматично зменшуючи його при швидких змінах у системі та збільшуючи при стабільному розв'язку. Крім того, у середовищах DesignXplorer та OptiSLang доступна *адаптивна оптимізація*, яка дозволяє автоматично змінювати параметри моделі, будувати метамоделі та визначати найважливіші параметри конструкції.

Використання апостеріорних оцінок похибки в адаптивних процедурах дає змогу не лише підвищити якість чисельного розв'язку, але й оптимізувати обчислювальні витрати, зосереджуючи ресурси на найбільш критичних ділянках розрахункової області. Таким чином, адаптивні підходи є важливим інструментом для реалізації ефективного чисельного аналізу складних інженерних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній науковій літературі МСЕ представлений надзвичайно широким спектром досліджень, що охоплюють як фундаментальні теоретичні аспекти, так і прикладні інженерні реалізації. Значний обсяг робіт, присвячених розвитку, удосконаленню та практичному застосуванню цього методу, свідчить про його ключову роль у чисельному моделюванні складних механічних і фізичних процесів.

У роботі [1] систематизовано математичні принципи МСЕ, зокрема формулювання елементів, чисельні алгоритми та особливості їх реалізації в інженерних задачах, що робить це джерело базовим для подальших досліджень у галузі чисельного моделювання. Видання [2] розширює ці положення, зосереджуючись на нелінійній механіці суцільного середовища, включно з кінематикою великих деформацій, складними матеріальними моделями та чисельними методами. У свою чергу, робота [3] поєднує теоретичні концепції МСЕ з практичними рекомендаціями щодо побудови скінченно-елементних моделей, акцентуючи увагу на типових помилках, особливостях апроксимації та застосуванні методу в інженерній практиці.

Питання побудови ефективних апостеріорних оцінок похибки та адаптивних стратегій у МСЕ активно досліджується впродовж останніх десятиліть, особливо в контексті *hp*-адаптивних методів, які поєднують локальне уточнення сітки (*h*-адаптацію) та підвищення порядку апроксимації (*p*-адаптацію).

У роботі [4] запропоновано підхід до декомпозиції апостеріорної оцінки похибки, побудованої на основі еталонного розв'язку (*reference solution*). Автори розглядають структуру оцінки в контексті *hp*-адаптивного методу та демонструють, що поділ оцінки на локальні компоненти дозволяє точніше визначати області, де необхідне уточнення сітки або підвищення порядку апроксимації. Класичні результати щодо адаптивних *hp*-методів закладені у статті [5]. Особливу увагу приділено адаптивній *hp*-версії в одномірному випадку. Автори показали, що поєднання локального уточнення сітки та збільшення порядку апроксимації забезпечує експоненційну збіжність для широкого класу задач, що є теоретичним аргументом на користь *hp*-методів. Монографія [6] присвячена *hp*-методам для задач із сингулярними збуреннями. У роботі детально описано конструкцію апроксимаційних просторів, аналіз збіжності та методи побудови адаптивних стратегій. У статті [7] розглянуто цільово-орієнтовані (*goal-oriented*) адаптивні методи для еліптичних задач. Автори пропонують удосконалені алгоритми, що підвищують точність оцінювання розв'язку. Цільово-орієнтована адаптація є важливою для задач, де інтерес зосереджено не на глобальній нормі похибки, а на конкретних фізичних величинах (наприклад, напруженнях у критичних точках конструкції).

Подальші дослідження у сфері МСЕ залишаються актуальними з огляду на зростаючу складність інженерних задач та підвищені вимоги до точності чисельного моделювання. Актуальність також зумовлена необхідністю моделювання багатофізичних процесів, складних геометрій та матеріалів із нелінійною

поведінкою, що вимагає розроблення більш гнучких і стійких чисельних алгоритмів. Сукупність цих чинників підкреслює важливість продовження досліджень, спрямованих на підвищення ефективності та надійності сучасних скінченно-елементних технологій.

Метою дослідження є розробка та реалізація адаптивної hp-методики для моделювання просторової контактної взаємодії жорсткого штамп з пружним півпростором, створення програмного інструментарію для автоматизації обчислювального процесу та дослідження точності отриманих результатів на основі апостеріорних оцінок похибки.

Виклад основного матеріалу. У просторовій постановці розглядається вдавлення в однорідний ізотропний пружний півпростір $x_3 \leq 0$ абсолютно жорсткого штамп з плоскою гладкою основою; у плані контактна область є двозв'язною Ω , обмеженою двома замкненими концентричними контурами Γ_1, Γ_2 (контакт у формі симетрично zdeформованого еліптичного кільця, див. рис. 1), при цьому дотичні напруження на площині Ox_1x_2 відсутні. Контактна область задається як двозв'язна. У моделі не враховується сила тертя між штампом і півпростором [8, 9].

Для чисельної реалізації використано матеріал Structural Steel: $\rho = 7850$ кг/м³, $E = 2.0 \times 10^{11}$ Па (200 ГПа), $\nu = 0.3$, $G \approx 7.6923 \times 10^{10}$ Па; штампу призначено той самий матеріал, але його оголошено абсолютно твердим (Rigid). Геометрія штамп: зовнішній діаметр 100 мм, внутрішній – 40 мм вздовж більшої напіввісі; зовнішній діаметр 62 мм, внутрішній – 18 мм вздовж меншої напіввісі; навантаження центрально прикладене $P = 1000$ Н.

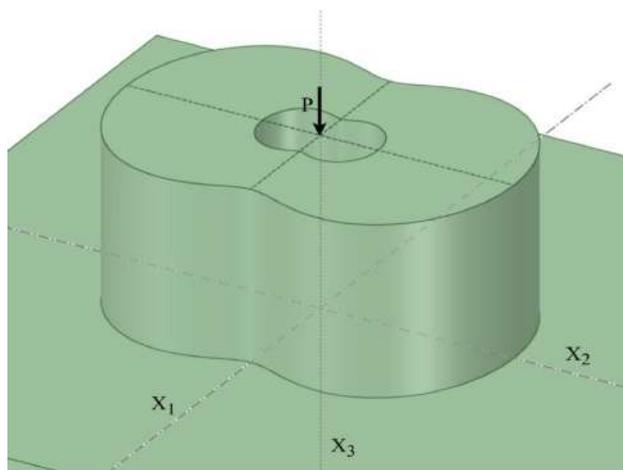


Рис. 1. Загальна схема взаємодії контактуючих тіл

У працях [8, 9] для зазначеної контактної задачі наведено як строгий аналітичний розв'язок, так і чисельний, що забезпечує можливість їх використання як еталонних референтних даних для верифікації коректності та кількісного оцінювання точності адаптивних методів, запропонованих у цьому дослідженні.

Для оцінювання похибки отриманого розв'язку будемо застосовувати апостеріорну оцінку точності. Загальний формальний запис апостеріорної оцінки має такий вигляд:

$$\|u - u_h\| \leq M(u_h, D),$$

де u – точний розв'язок у межах розглянутої математичної постановки [8, 9], u_h – наближений чисельний розв'язок, D – початкові дані задачі (коефіцієнти рівнянь, геометрія області, права частина, граничні умови тощо), M – мажоранта.

Як показник якості роботи апостеріорної оцінки використаємо індекс ефективності, який характеризує ступінь переоцінювання мажорантою істинної похибки та дозволяє виявити можливість її недооцінки. Задаємо його наступним чином:

$$I_{eff} = \frac{M(u_h, D)}{u - u_h}.$$

Опис програмного пакету. Розроблений програмний пакет є інтегрованим рішенням для автоматизації чисельного моделювання контактної взаємодії тіла складної форми з пружним півпростором із використанням адаптивних hp-схем МСЕ. Адаптація реалізується шляхом h-уточнення сітки в зоні контакту та в областях інтенсивної зміни напружно-деформівного стану. Р-збагачення застосовується для оцінювання локальної похибки та визначення зон наступного уточнення. Архітектура програмного пакету реалізована як багатомодульна система, що поєднує розв'язання задач у Ansys [10], адаптивне сіткоутворення в Gmsh або Ansys APDL, поспроцесінг даних у MATLAB і автоматизацію обчислювального циклу засобами batch та

Python. Така структура забезпечує модульність, відтворюваність і масштабованість для різних постановок задач. У складі розробленого програмного пакета функціонують такі основні модулі:

– Модуль керування обчислювальним процесом (*AutoRun.bat*) виконує роль «диспетчера» ітераційного циклу. Він забезпечує послідовний запуск етапів моделювання, перевірку наявності необхідних проміжних файлів, керування каталогами ітерацій та ведення журналів виконання.

– Модуль побудови матриці ваг W (*WeightMatrix.m*) реалізує інтерполяцію результатів на регулярну сітку, нормування величин і формування матриці ваг W , що відображає локальну «важливість» області для згущення сітки.

– Модуль адаптивного сіткоутворення (*model_adaptiveV.geo*) створено для опису правил побудови скінченно-елементної сітки з керуванням локальним розміром елементів. Ключовим є наступне – області з високими значеннями W отримують менший характерний розмір елемента, тоді як «спокійні» зони – грубішу сітку. Це дозволяє концентрувати обчислювальні ресурси у зоні контакту та поблизу концентраторів напружень.

– Модуль конвертації та інтеграції сіток (*halfspace_fix.mac*, *mesh_converter.py*) виконує перетворення сіток Gmsh у формат, сумісний з Ansys (наприклад, *.cbd*). Оскільки адаптивне сіткоутворення може виконуватися поза Ansys, необхідним є етап коректного перенесення сітки у формат, сумісний з розв'язувачем. Python-скрипт конвертації (*mesh_converter.py*) забезпечує перетворення даних сітки (вузли, елементи, групи) у представлення, прийнятне для Ansys. APDL-макриси (наприклад, *halfspace_fix.mac*) використовуються для технічної інтеграції. Модуль фактично забезпечує «міст» між генератором сітки та МСЕ-розв'язувачем.

– Модуль постпроцесінгу (*MATLAB*) виконує обробку результатів, обчислює узагальнені показники, формує таблиці й графіки.

Середовище розроблення програмного пакету сформовано на основі інтегрованої взаємодії інструментів Ansys Workbench/Mechanical, MAPDL/APDL, MATLAB, Gmsh та Python, а також batch-скриптів для керування модулями пакету.

Подання даних і схема обчислень визначаються набором таких основних структур: масивами напружень, даними що до регулярних інтерполяційних сіток, матрицею вагових коефіцієнтів W , а також файлами опису фонові сітки для Gmsh. Обмеженням реалізації є підтримка у розв'язувачі лише порядків $p = 1$ та $p = 2$ для певних типів скінченних елементів. Разом з тим, концепція оцінювання похибки за p -рівнями та керування h -згущенням не є принципово обмеженою цими порядками.

Геометрію та початкову сітку МСЕ для задачі, описаної раніше, надано на рис. 2. Процес адаптації сітки завершується після досягнення величини відносної похибки менше ніж 7%. На рис. 3 і рис. 4 наведено результати адаптації сіток для випадків $p = 1$ та $p = 2$ відповідно.

У таблиці 1 наведено порівняльні результати чисельних розрахунків для різних варіантів адаптації сітки та різних порядків апроксимації. Показники відображають вплив густини сітки та рівня p -збагачення на точність розв'язку та ефективність апостеріорної оцінки похибки. Зіставлення цих даних дає змогу оцінити, як адаптація та підвищення порядку апроксимації впливають на збіжність, точність і якість апостеріорної оцінки.

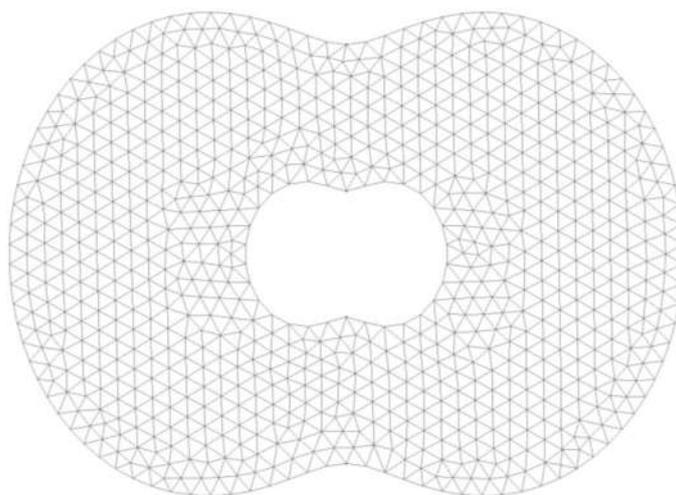


Рис. 2. Геометрія і початкова сітка МСЕ

Показники, наведені в таблиці, відображають ключові характеристики якості чисельного розв'язку. Кількість вузлів визначає загальну кількість точок дискретизації моделі. Кількість елементів у зоні контакту характеризує густину сітки саме в області, де виникають найбільші напруження та де потрібна підвищена

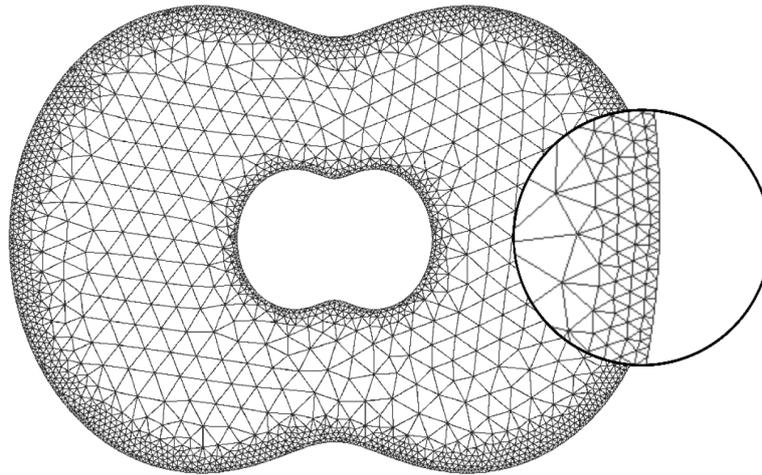


Рис. 3. Сітка МСЕ після адаптації для випадку $p = 1$

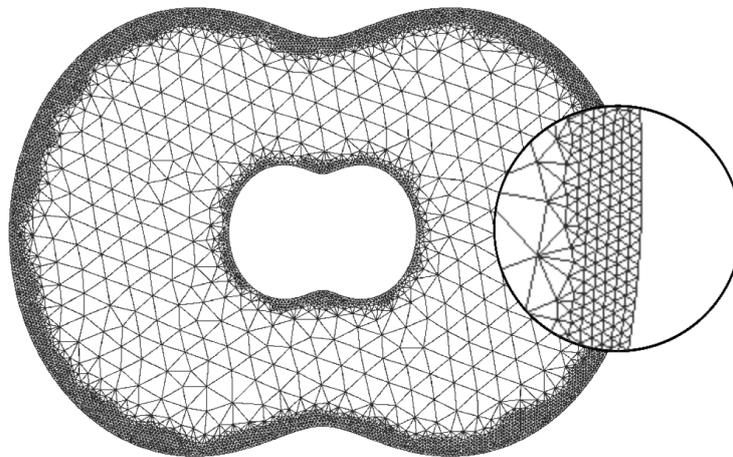


Рис. 4. Сітка МСЕ після адаптації для випадку $p = 2$

точність. Помилка (%) показує відносну різницю між чисельним та еталонним розв'язком, тобто рівень точності моделювання. Індекс ефективності демонструє, наскільки точно мажоранта оцінює реальну похибку: значення, близьке до одиниці, свідчить про високу якість апостеріорної оцінки.

Таблиця 1

Порівняння розрахункових результатів для різних випадків адаптації

	Кількість вузлів	Кількість елем. у зоні контакту	Помилка %	Індекс ефективн
Рис. 2, $p = 1$	334	590	29.1 %	1.91
Рис. 2, $p = 2$	1258	590	23.7 %	1.8
Рис. 3, $p = 1$	5840	10 894	11.8 %	1.4
Рис. 3, $p = 2$	22 544	10 894	9.9 %	1.31
Рис. 4, $p = 1$	12 902	25 048	7.1 %	1.32
Рис. 4, $p = 2$	50 852	25 048	6.2 %	1.25

На рис. 2 сітка недостатньо точна, похибка велика. Індекс ефективності майже 2 означає, що апостеріорна оцінка переоцінює реальну похибку майже вдвічі. Підвищення порядку p на грубій сітці дає помірне покращення точності (похибка зменшується на ~18 %), але індекс ефективності залишається високим. Це типовий результат для грубої сітки.

На рис. 3 на адаптованій сітці p -збагачення знову дає зменшення похибки (~16 %), а індекс ефективності покращується, наближаючись до 1.3.

На рис. 4 найкращий результат серед трьох варіантів. Ефект від підвищення p зберігається. Похибка зменшилася до 6.2 %, а індекс ефективності став 1.25, що свідчить про високу якість апостеріорної оцінки. Сітка стає густішою саме там, де це потрібно, без надмірного збільшення загальної кількості вузлів.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує ефективність застосування адаптивних hp-методів для чисельного аналізу просторових контактних задач із двозв'язною областю контакту. Використання апостеріорних оцінок похибки дає змогу цілеспрямовано уточнювати сітку в критичних зонах та контролювати якість отриманого розв'язку.

Загальний висновок можна подати так. Зі збільшенням порядку апроксимації p точність чисельного розв'язку помітно підвищується, а індекс ефективності наближається до одиниці, що свідчить про більш надійну та стабільну оцінку похибки. Адаптивні методи забезпечують зменшення похибки у 4–5 разів без суттєвого збільшення кількості вузлів, що робить їх ефективним інструментом для оптимізації обчислювальних витрат. Найкращий баланс між точністю та продуктивністю демонструє варіант із порядком апроксимації $p = 2$, який забезпечує найнижчу похибку та найвищу якість апостеріорної оцінки.

Розроблений програмний пакет продемонстрував здатність автоматизувати повний цикл адаптивного моделювання та забезпечити відтворюваність результатів. Отримані висновки свідчать про доцільність подальшого розвитку hp-адаптивних стратегій та їх інтеграції в сучасні інженерні комплекси для підвищення точності та надійності чисельного моделювання складних механічних систем.

Список використаних джерел:

1. Bathe K. J. Finite Element Procedures in Engineering Analysis. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1982. URL: <https://www.scribd.com/document/359408011/FEA-Finite-Element-Procedures-by-K-J-Bathe-pdf>
2. Bonet J., Wood R. D. Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. URL: <https://www.researchgate.net/profile/Nirmala-Svsg/post/How-to-use-shell-element-of-vector-form-intrinsic-finite-element/attachment/59d6349a79197b80779923f2/AS%3A380479242031115%401467724728999/download/666.pdf>
3. Cook R. D., Malkus D. S., Plesha M. E. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. New York : Wiley, 2002. URL: <https://pdfcoffee.com/robert-d-cook-david-s-malkus-michael-e-plesha-concepts-and-applications-of-finite-element-analysis-3rd-edition-1989-483-pdf-free.html>.
4. Drebotiy R., Shynkarenko H. Elementwise decomposition of a posteriori error estimator based on reference solution for hp-adaptive finite element method. *Visnyk of the Lviv University. Series Applied Mathematics and Informatics*, 2018, no. 26, pp. 56–69. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Vlnu_prmat_2018_26_10.pdf
5. Gui W., Babuška I. The h, p and h-p versions of the finite element method in 1 dimension. Part 3: The adaptive h-p version. *Numerische Mathematik*, 1986, vol. 49, pp. 659–683. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA156626.pdf>
6. Melenk J. M. hp-Finite Element Methods for Singular Perturbations. Berlin: Springer, 2002. 326 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/b84212>
7. Bürg M., Nazarov M. Goal-oriented adaptive finite element methods for elliptic problems revisited. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2015, vol. 287, pp. 125–147. URL: https://www.researchgate.net/publication/272024852_Goal-Oriented_Adaptive_Finite_Element_Methods_for_Elliptic_Problems_Revisited
8. Зайцева Т. А., Шишканова Г. А. Розв'язання просторових контактних задач для неklasичних багатозв'язних областей. Дніпро: Вид-во ДНУ, 2011. 192 с.
9. Honcharov Y. A., Zaytseva T. A. Computer Simulation of the Interaction of a Doubly Bound in the Plane of a Punch and an Elastic Half-Space. *Problems of Applied Mathematics and Mathematical Modeling*, 2023, vol. 23, pp. 46–52. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewById/2294060>.
10. Ansys Free Student Software Downloads. URL: <https://www.ansys.com/academic/freestudent-products> (дата звернення: 18.12.2025).

References:

1. Bathe, K. J. (1982). Finite element procedures in engineering analysis. Prentice Hall. Retrieved from: <https://www.scribd.com/document/359408011/FEA-Finite-Element-Procedures-by-K-J-Bathe-pdf>
2. Bonet, J., & Wood, R. D. (2008). Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis. Cambridge University Press. Retrieved from: <https://www.researchgate.net/profile/Nirmala-Svsg/post/How-to-use-shell-element-of-vector-form-intrinsic-finite-element/attachment/59d6349a79197b80779923f2/AS%3A380479242031115%401467724728999/download/666.pdf>
3. Cook, R. D., Malkus, D. S., & Plesha, M. E. (2002). Concepts and applications of finite element analysis. Wiley. Retrieved from: <https://pdfcoffee.com/robert-d-cook-david-s-malkus-michael-e-plesha-concepts-and-applications-of-finite-element-analysis-3rd-edition-1989-483-pdf-free.html>
4. Drebotiy, R., & Shynkarenko, H. (2018). Elementwise decomposition of a posteriori error estimator based on reference solution for hp-adaptive finite element method. *Visnyk of the Lviv University. Series Applied Mathematics and Informatics*, 26, 56–69. Retrieved from: <https://pdfcoffee.com/robert-d-cook-david-s-malkus-michael-e-plesha-concepts-and-applications-of-finite-element-analysis-3rd-edition-1989-483-pdf-free.html>

-
5. Gui, W., & Babuska, I. (1986). The h, p and h-p versions of the finite element method in 1 dimension. Part 3: The adaptive h-p version. *Numerische Mathematik*, 49, 659–683. Retrieved from: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA156626.pdf>
 6. Melenk, J. M. (2002). hp-finite element methods for singular perturbations. Springer. Retrieved from: <https://link.springer.com/book/10.1007/b84212>
 7. Bürg, M., & Nazarov, M. (2015). Goal-oriented adaptive finite element methods for elliptic problems revisited. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 287, 125–147. Retrieved from: <https://www.researchgate.net/.../272024852>
 8. Zaitseva, T. A., & Shyshkanova, H. A. (2011). Rozv'yazannia prostoroovykh kontaknykh zadach dla neklasychnykh bahatozviaznykh oblastei [Solution of spatial contact problems for non-classical multiply connected domains]. Dnipro National University Press.
 9. Honcharov, Y. A., & Zaytseva, T. A. (2023). Computer simulation of the interaction of a doubly bound in the plane of a punch and an elastic half-space. *Problems of Applied Mathematics and Mathematical Modeling*, 23, 46–52. Retrieved from: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/2294060>
 10. Ansys. (2025). *Ansys free student software downloads*. Retrieved from: <https://www.ansys.com/academic/freestudent-products>

Дата першого надходження статті до видання: 30.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

Зінченко А. Ю., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри математичних методів системного аналізу
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-1586-3645

ЕВОЛЮЦІЙНА ОПТИМІЗАЦІЯ АРХІТЕКТУРИ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ У ЗАДАЧАХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ

У даній роботі розглядається підхід до автоматизованої оптимізації архітектури згорткових нейронних мереж на основі еволюційних обчислень. Основну увагу зосереджено на застосуванні генетичних алгоритмів як одного з найбільш ефективних класів еволюційних алгоритмів, здатних здійснювати глобальний пошук оптимальних рішень у складних багатовимірних просторах параметрів. Запропонований підхід орієнтований на оптимізацію структурних параметрів згорткової нейронної мережі, зокрема кількості згорткових і повноз'єднаних шарів, числа нейронів у кожному шарі, кількості та розміру згорткових фільтрів, що безпосередньо впливають на узагальнювальні властивості моделі.

У роботі проведено аналіз основних принципів функціонування згорткових нейронних мереж та їх застосування в задачах класифікації зображень. Розглянуто базові компоненти архітектури згорткових нейронних мереж, включаючи згорткові шари, шари субдискретизації та повноз'єднані шари, а також проаналізовано вплив їх параметрів на точність класифікації. На основі цього аналізу було реалізовано базову згорткову нейронну мережу з архітектурою, підбраною безпосередньо розробником, та проведено експериментальне дослідження її роботи на тестових і реальних даних.

Крім цього, на основі основних принципів генетичних алгоритмів було розроблено власний генетичний алгоритм, призначений для оптимізації архітектури згорткової нейронної мережі. У якості функції пристосованості використано показники точності класифікації, що дозволяє безпосередньо орієнтувати еволюційний пошук на підвищення якості роботи моделі.

Розроблений генетичний алгоритм здійснює автоматизований пошук оптимальної архітектури нейронної мережі шляхом еволюційної модифікації параметрів її структури. У процесі еволюції відбувається поступове покращення характеристик мережі за рахунок відбору найбільш ефективних конфігурацій та генерації нових архітектур на основі операцій схрещування та мутації. Експериментально показано, що вже протягом десяти поколінь еволюції можливо отримати архітектуру згорткової нейронної мережі, яка забезпечує істотно кращі результати порівняно з початковою, вручну спроектованою моделлю.

Ключові слова: згорткові нейронні мережі, еволюційні алгоритми, генетичний алгоритм, інтелектуальний аналіз даних, обробка зображень.

Zinchenko A. Yu. Evolutionary optimization of convolutional neural network architectures in intelligent data analysis tasks

This paper presents an approach to the automated optimization of convolutional neural network architectures based on evolutionary computation. The main focus is placed on the application of genetic algorithms as one of the most effective classes of evolutionary algorithms capable of performing global search for optimal solutions in complex high-dimensional parameter spaces. The proposed approach is aimed at optimizing the structural parameters of a convolutional neural network, including the number of convolutional and fully connected layers, the number of neurons in each layer, as well as the number and size of convolutional filters, which directly affect the generalization properties of the model.

The paper analyzes the fundamental principles of convolutional neural networks and their application to image classification tasks. The basic components of convolutional neural network architectures are examined, including convolutional layers, subsampling layers, and fully connected layers, and the influence of their parameters on classification accuracy is investigated. Based on this analysis, a baseline convolutional neural network with an architecture manually selected by the developer was implemented, and an experimental evaluation of its performance on both test and real-world datasets was conducted.

In addition, a proprietary genetic algorithm was developed on the basis of the fundamental principles of genetic algorithms to optimize the architecture of the convolutional neural network. Classification accuracy was employed as the fitness function, allowing the evolutionary search process to be directly guided toward improving the model's performance.

The developed genetic algorithm performs an automated search for an optimal neural network architecture through evolutionary modification of its structural parameters. During the evolutionary process, a gradual improvement of network characteristics is achieved by selecting the most effective configurations and generating new architectures through crossover and mutation operations. Experimental results demonstrate that within ten generations of evolution, it is possible to obtain a convolutional neural network architecture that significantly outperforms the initial manually designed model.

Key words: convolutional neural networks, evolutionary algorithms, genetic algorithm, intelligent data analysis, image processing.



© А. Ю. Зінченко, 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. У сучасних задачах комп'ютерного зору та інтелектуального аналізу зображень згорткові нейронні мережі посідають провідне місце завдяки здатності автоматично виділяти інформативні ознаки та забезпечувати високу точність класифікації. Разом із цим ефективність використання згорткових нейронних мереж значною мірою визначається вибором їх архітектури, зокрема кількістю та типом шарів, числом нейронів, параметрами згорткових фільтрів і механізмами агрегування. Процес проектування архітектури таких мереж традиційно здійснюється на основі емпіричного досвіду розробника або шляхом багаторазового ручного підбору гіперпараметрів, що є трудомістким, суб'єктивним і не гарантує досягнення оптимальних результатів, особливо при роботі з реальними, зашумленими або нерівномірно розподіленими даними.

Зазначені обмеження особливо загострюються у випадках застосування згорткових нейронних мереж до аналізу реальних зображень, які характеризуються високим рівнем шуму, варіативністю масштабів об'єктів, неоднорідними умовами освітлення та значною різницею між навчальними і робочими вибірками. За таких умов архітектура мережі, що демонструє високу точність на тестових даних, часто виявляється недостатньо стійкою при роботі з реальними даними, що призводить до зниження узагальнювальної здатності та погіршення практичних результатів класифікації.

Крім того, зростання складності сучасних задач комп'ютерного зору супроводжується необхідністю одночасного врахування великої кількості структурних параметрів нейронної мережі, таких як глибина моделі, конфігурація згорткових шарів, кількість та розміри фільтрів, способи агрегації ознак і параметри повноз'єднаних шарів. Простір можливих архітектур при цьому має комбінаторний характер, що унеможливає ефективний перебір усіх варіантів за допомогою класичних методів оптимізації або ручного налаштування.

Існуючі підходи до автоматизації вибору архітектури згорткових нейронних мереж, зокрема методи градієнтної оптимізації гіперпараметрів або шаблонні архітектури, не завжди забезпечують достатню гнучкість та адаптивність до специфіки конкретної задачі та структури даних. У зв'язку з цим актуальною є проблема розроблення таких методів оптимізації архітектури нейронних мереж, які б дозволяли здійснювати глобальний пошук ефективних структурних рішень у складних багатовимірних просторах параметрів без жорстких припущень щодо форми функції якості.

Одним із перспективних напрямів розв'язання зазначеної проблеми є використання еволюційних алгоритмів, зокрема генетичних алгоритмів, які базуються на принципах природного добору та дозволяють ефективно досліджувати простір можливих архітектур нейронних мереж. Застосування генетичних алгоритмів створює передумови для автоматизованого синтезу архітектури згорткових нейронних мереж, адаптованої до конкретних умов задачі класифікації зображень, з урахуванням вимог до точності, стійкості та узагальнювальної здатності моделей.

Таким чином, актуальною є науково-прикладна задача розроблення та дослідження генетичного алгоритму для оптимізації архітектури згорткових нейронних мереж, здатного підвищити ефективність класифікації зображень, особливо при роботі з реальними даними, та зменшити залежність якості результатів від суб'єктивного вибору параметрів розробником.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить, що впродовж останніх років значна увага науковців зосереджена на розвитку методів глибинного навчання для задач комп'ютерного зору, зокрема класифікації та розпізнавання зображень. Базові принципи побудови згорткових нейронних мереж і їх ефективність у широкому спектрі прикладних задач детально висвітлені в фундаментальній роботі LeCun та ін. [1], де показано, що глибинні нейронні мережі здатні автоматично формувати ієрархічні ознаки з даних, забезпечуючи високу точність класифікації.

Подальший розвиток згорткових нейронних мереж пов'язаний із роботою Krizhevsky та ін. [2], у якій вперше було продемонстровано суттєвий прорив у задачі класифікації зображень за допомогою глибокої згорткової архітектури. Результати цього дослідження підтвердили визначальну роль архітектури нейронної мережі у досягненні високої точності та стимулювали активні дослідження, спрямовані на пошук ефективних структурних рішень для різних класів задач.

Разом із тим, проектування архітектури нейронних мереж традиційно залишається складним і трудомістким процесом. Класичні підходи до оптимізації параметрів мережі часто ґрунтуються на ручному підборі або локальних методах оптимізації, що не дозволяє ефективно досліджувати простір можливих архітектур. У цьому контексті особливу увагу привертають еволюційні алгоритми, теоретичні основи яких були закладені в роботі Holland [3]. Генетичні алгоритми, що імітують механізми природного добору, продемонстрували здатність знаходити ефективні рішення в умовах складних багатовимірних просторів параметрів.

Подальший розвиток ідей еволюційної оптимізації нейронних мереж представлено в роботі Stanley та Miikkulainen [4], де запропоновано підхід до еволюційного синтезу топологій нейронних мереж. Авторами показано, що еволюційне нарощування структури мережі дозволяє отримувати архітектури з покращеними узагальнювальними властивостями без жорстких обмежень на початкову конфігурацію.

Безпосереднє поєднання згорткових нейронних мереж і генетичних алгоритмів розглянуто в роботі Xie та Yuille [5], де запропоновано підхід Genetic CNN, що дозволяє автоматизувати пошук архітектур згорткових нейронних мереж. Результати дослідження демонструють ефективність еволюційних методів для

оптимізації структури мереж у задачах комп'ютерного зору та підтверджують перспективність такого підходу порівняно з ручним проєктуванням архітектур.

Узагальнення сучасних підходів до автоматизованого проєктування нейронних мереж наведено в оглядовій роботі Elsken та ін. [6], де розглядаються методи Neural Architecture Search, включаючи еволюційні, градієнтні та комбіновані підходи. Автори відзначають, що еволюційні алгоритми залишаються одним із найбільш універсальних інструментів для оптимізації архітектури нейронних мереж, особливо у випадках, коли цільова функція є складною або недиференційовною.

В роботі [7] запропонований підхід для покращення розпізнавання структурованого тексту, шляхом інтеграції нейронної мережі YOLO з технологією OCR, що значно підвищило ефективність системи розпізнавання тексту, забезпечуючи більш точне виявлення текстових об'єктів для їх подальшого розпізнавання.

Таким чином, аналіз сучасних наукових публікацій показує, що хоча згорткові нейронні мережі широко застосовуються в задачах класифікації зображень, проблема автоматизованої оптимізації їх архітектури залишається актуальною. Це обумовлює доцільність подальших досліджень, спрямованих на розроблення генетичних алгоритмів для оптимізації архітектури згорткових нейронних мереж з метою підвищення їх ефективності при роботі з реальними даними.

Мета статті: розроблення та дослідження генетичного алгоритму для автоматизованої оптимізації архітектури згорткових нейронних мереж у задачах класифікації зображень, а також у проведенні експериментальної оцінки впливу еволюційної оптимізації структурних параметрів нейронної мережі на точність класифікації при роботі з тестовими та реальними даними.

Виклад основного матеріалу. Особливості застосування згорткових нейронних мереж для інтелектуального аналізу зображень. Згорткові нейронні мережі є одним із базових інструментів сучасного комп'ютерного зору та інтелектуального аналізу зображень. Їх широке застосування зумовлене здатністю автоматично виявляти просторові та ієрархічні ознаки без необхідності ручного формування дескрипторів. На відміну від класичних методів обробки зображень, що базуються на фіксованих фільтрах і евристичних правилах, згорткові нейронні мережі забезпечують адаптивне навчання ознак безпосередньо з даних, що дозволяє ефективно працювати з різноманітними типами зображень та складними умовами зйомки.

Інтелектуальний аналіз зображень передбачає вирішення таких задач, як класифікація, сегментація, виявлення об'єктів та розпізнавання візуальних патернів. У межах цих задач згорткові нейронні мережі використовують принцип локальних рецептивних полів, відповідно до якого кожен нейрон обробляє лише обмежену ділянку вхідного зображення. Такий підхід дозволяє значно зменшити кількість параметрів моделі, знизити обчислювальну складність та забезпечити інваріантність до зсувів і масштабування об'єктів.

Типова архітектура згорткової нейронної мережі складається зі згорткових шарів, шарів агрегації (subsampling або pooling) та повноз'єднаних шарів. Згорткові шари відповідають за виділення локальних ознак, таких як краї, контури та текстури, тоді як на більш глибоких рівнях формуються складніші абстрактні представлення, що відповідають окремим об'єктам або їх частинам. Шари агрегації зменшують просторову розмірність ознак, підвищують стійкість мережі до шумів і зменшують ризик перенавчання. Повноз'єднані шари інтегрують виділені ознаки та формують фінальне рішення щодо класу зображення.

Ефективність застосування згорткових нейронних мереж значною мірою залежить від вибору їх архітектури. Кількість шарів, число нейронів у кожному шарі, розміри згорткових фільтрів і способи агрегації безпосередньо впливають на здатність мережі до узагальнення та її продуктивність при роботі з реальними даними. Невдало підібрана архітектура може призводити до перенавчання або, навпаки, до недостатньої складності моделі, що знижує точність класифікації.

Особливої актуальності ця проблема набуває в задачах аналізу реальних зображень, які характеризуються наявністю шумів, варіативністю освітлення, різними масштабами об'єктів та неповнотою навчальних вибірок. У таких умовах архітектура, що демонструє високі показники на тестових даних, може втрачати ефективність при практичному застосуванні. Це зумовлює необхідність використання методів автоматизованої оптимізації архітектури згорткових нейронних мереж.

Одним із перспективних підходів до вирішення цієї задачі є застосування еволюційних алгоритмів, які дозволяють здійснювати глобальний пошук ефективних архітектур у багатовимірному просторі параметрів. Поєднання згорткових нейронних мереж з генетичними алгоритмами створює можливість автоматизованого синтезу структур мереж, адаптованих до конкретних умов задачі інтелектуального аналізу зображень, що підвищує точність класифікації та стійкість моделей до змін вхідних даних.

Нижче наведено приклад реалізації згорткової нейронної мережі для класифікації зображень з використанням мови програмування Python та високорівневого інтерфейсу Keras, який функціонує поверх обчислювального фреймворку TensorFlow.

Опис генетичного алгоритму оптимізації архітектури. Для автоматизованого пошуку ефективної архітектури згорткової нейронної мережі у даному дослідженні використовується генетичний алгоритм, який дозволяє здійснювати еволюційну оптимізацію структурних параметрів моделі без необхідності аналітичного опису залежності між архітектурою та якістю класифікації.

```
In [23]: import numpy as np
import random
import matplotlib.pyplot as plt
from tensorflow.keras.models import Sequential
from tensorflow.keras.layers import Conv2D, MaxPooling2D, Dense, Flatten
```

Завантаження набору даних для тренування моделі

```
In [7]: X_train = np.loadtxt('input.csv', delimiter = ',')
Y_train = np.loadtxt('labels.csv', delimiter = ',')

X_test = np.loadtxt('input_test.csv', delimiter = ',')
Y_test = np.loadtxt('labels_test.csv', delimiter = ',')
```

```
In [20]: X_train = X_train.reshape(len(X_train), 100, 100, 3)
Y_train = Y_train.reshape(len(Y_train), 1)

X_test = X_test.reshape(len(X_test), 100, 100, 3)
Y_test = Y_test.reshape(len(Y_test), 1)

X_train = X_train/255.0
X_test = X_test/255.0
```

```
In [14]: print("Shape of X_train: ", X_train.shape)
print("Shape of Y_train: ", Y_train.shape)
print("Shape of X_test: ", X_test.shape)
print("Shape of Y_test: ", Y_test.shape)
```

```
Shape of X_train: (2000, 100, 100, 3)
Shape of Y_train: (2000, 1)
Shape of X_test: (400, 100, 100, 3)
Shape of Y_test: (400, 1)
```

```
In [28]: idx = random.randint(0, len(X_train))
plt.imshow(X_train[idx, :])
plt.show()
```



Рис. 1. Реалізація згорткової нейронної мережі для класифікації зображень

Генетичний алгоритм розглядає множину можливих архітектур нейронних мереж як популяцію особин $P = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$, де кожна особина a_i відповідає окремій архітектурі згорткової нейронної мережі, а N – розмір популяції.

Архітектура нейронної мережі подається у вигляді хромосоми, яка складається з набору генів: $a_i = (g_1, g_2, \dots, g_k)$, де кожен ген g_j кодує певний структурний параметр мережі, зокрема:

- кількість згорткових шарів;
- кількість фільтрів у кожному згортковому шарі;
- розмір ядра згортки;
- параметри шару субдискретизації;
- кількість нейронів у повноз'єднаному шарі.

Таке подання забезпечує можливість еволюційної модифікації архітектури при збереженні її структурної коректності.

Для оцінювання якості кожної особини використовується функція пристосованості, що базується на точності класифікації нейронної мережі після навчання на навчальній вибірці. Формально функція пристосованості визначається як $F(a_i) = Acc(a_i)$, де $Acc(a_i)$ – точність класифікації мережі з архітектурою a_i на валідаційній або тестовій вибірці.

У процесі еволюції максимізується значення функції пристосованості $a^* = \arg \max_{a_i \in P} F(a_i)$.

На кожному поколінні генетичного алгоритму здійснюється відбір особин із найвищими значеннями функції пристосованості. Відібрані архітектури використовуються для формування нового покоління за допомогою операторів схрещування та мутації.

Конфігурація та тренування моделі

```
In [30]: model = Sequential([
    Conv2D(32, (3,3), activation = 'relu', input_shape = (100, 100, 3)),
    MaxPooling2D((2,2)),

    Conv2D(32, (3,3), activation = 'relu'),
    MaxPooling2D((2,2)),

    Flatten(),
    Dense(64, activation = 'relu'),
    Dense(1, activation = 'sigmoid')
])
```

```
In [31]: model = Sequential()

model.add(Conv2D(32, (3,3), activation = 'relu', input_shape = (100, 100, 3)))
model.add(MaxPooling2D((2,2)))

model.add(Conv2D(32, (3,3), activation = 'relu'))
model.add(MaxPooling2D((2,2)))

model.add(Flatten())
model.add(Dense(64, activation = 'relu'))
model.add(Dense(1, activation = 'sigmoid'))
```

```
In [32]: model.compile(loss = 'binary_crossentropy', optimizer = 'adam', metrics = ['accuracy'])
```

```
In [32]: model.compile(loss = 'binary_crossentropy', optimizer = 'adam', metrics = ['accuracy'])
```

```
In [34]: model.fit(X_train, Y_train, epochs = 5, batch_size = 64)
```

```
Epoch 1/5
32/32 [=====] - 30s 934ms/step - loss: 0.3599 - accuracy: 0.8475
Epoch 2/5
32/32 [=====] - 29s 911ms/step - loss: 0.2853 - accuracy: 0.8800
Epoch 3/5
32/32 [=====] - 30s 946ms/step - loss: 0.2196 - accuracy: 0.9160
Epoch 4/5
32/32 [=====] - 32s 994ms/step - loss: 0.1694 - accuracy: 0.9395
Epoch 5/5
32/32 [=====] - 30s 931ms/step - loss: 0.1247 - accuracy: 0.9610
```

```
Out[34]: <keras.callbacks.History at 0x1de37b90850>
```

```
In [35]: model.evaluate(X_test, Y_test)
```

```
13/13 [=====] - 4s 149ms/step - loss: 0.9762 - accuracy: 0.6550
```

```
Out[35]: [0.9762333631515503, 0.6549999713897705]
```

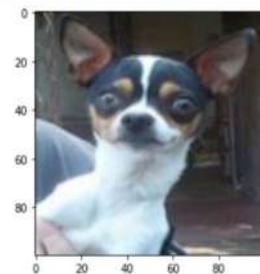
Тест моделі на реальних даних

```
In [43]: idx2 = random.randint(0, len(Y_test))
plt.imshow(X_test[idx2, :])
plt.show()

y_pred = model.predict(X_test[idx2, :].reshape(1, 100, 100, 3))
y_pred = y_pred > 0.5

if(y_pred == 0):
    pred = 'dog'
else:
    pred = 'cat'

print("Our model says it is a :", pred)
```



```
Our model says it is a : dog
```

Рис. 2. Конфігурація, тренування та тестування моделі на реальних даних

Оператор схрещування реалізується шляхом обміну частинами хромосом між двома батьківськими особинами: $a_{child} = Crossover(a_{parent_1}, a_{parent_2})$, що дозволяє поєднувати структурні характеристики різних архітектур.

Оператор мутації полягає у випадковій зміні значень окремих генів з малою ймовірністю p_m :
$$g'_j = \begin{cases} rand(G_j), & \text{ймовірність} - p_m \\ g_j, & \text{інакше} \end{cases}$$
, де $rand(G_j)$ – випадкове допустиме значення відповідного параметра.

Мутація сприяє підтриманню різноманітності популяції та зменшує ймовірність передчасної збіжності алгоритму до локального оптимуму.

Еволюційний процес триває протягом фіксованої кількості поколінь або до досягнення заданого значення функції пристосованості. У результаті роботи генетичного алгоритму формується архітектура згорткової нейронної мережі, яка демонструє покращені показники точності класифікації порівняно з початковими або вручну спроектованими моделями.

Наведемо реалізацію генетичного алгоритму для оптимізації архітектури згорткових нейронних мереж.

```
In [7]: class CNN(Sequential):
def __init__(self, nfilters, sfilters):
super().__init__()
tensorflow.random.set_seed(0)
self.add(Conv2D(nfilters[0], kernel_size=(sfilters[0], sfilters[0]), padding='same', activation='relu',
input_shape=(112, 92, 1)))
self.add(MaxPooling2D(pool_size=(2, 2), strides=(2, 2)))
self.add(Conv2D(nfilters[1], kernel_size=(sfilters[1], sfilters[1]), padding='same', activation='relu'))
self.add(MaxPooling2D(pool_size=(2, 2), strides=(2, 2)))
self.add(Conv2D(nfilters[2], kernel_size=(sfilters[2], sfilters[2]), padding='same', activation='relu'))
self.add(MaxPooling2D(pool_size=(2, 2), strides=(2, 2)))
self.add(Flatten())
self.add(Dropout(0.3))
self.add(Dense(512, activation='relu'))
self.add(Dense(40, activation='softmax'))
self.compile(optimizer='adam', loss='categorical_crossentropy', metrics=['accuracy'])
```

Рис. 3. Лістинг коду архітектури згорткової нейронної мережі

По завершенню виконання алгоритму можемо оцінити точність розпізнавання зображень:

Генетичний алгоритм запускався з такими параметрами:

Враховуючи стохастичний характер ініціалізації параметрів нейронної мережі у середовищі TensorFlow, максимальна точність класифікації на реальних даних становила приблизно 97,5 %, що проілюстровано на графіку.

На рис. 7 зображено динаміку зміни функції пристосованості залежно від номера покоління генетичного алгоритму. В якості показника пристосованості використано точність класифікації. Отримані результати демонструють ефективність еволюційного пошуку, оскільки зі збільшенням кількості поколінь спостерігається стале зростання значення fitness та досягнення близького до оптимального рівня вже протягом перших десяти поколінь.

Після десяти поколінь еволюційної оптимізації генетичним алгоритмом було знайдено архітектуру згорткової нейронної мережі з шістьма оптимізованими шарами (без урахування вхідного шару), для яких кількість нейронів дорівнювала 66, 40, 88, 3, 1 та 1 відповідно.

Висновки. У роботі реалізовано згорткову нейронну мережу для задачі класифікації зображень та проведено експериментальну оцінку її ефективності на тестових і реальних даних. Для базової моделі архітектура нейронної мережі була сформована розробником на основі емпіричних міркувань, що дозволило досягти високої точності класифікації на тестовій вибірці, однак виявило суттєве зниження точності при роботі з реальними даними.

У межах дослідження реалізовано генетичний алгоритм для автоматизованої оптимізації архітектури згорткової нейронної мережі. Запропонований алгоритм забезпечує еволюційний пошук ефективних структурних конфігурацій шляхом оптимізації кількості згорткових і повноз'єднаних шарів, числа нейронів у кожному шарі, а також кількості та розмірів згорткових фільтрів. У процесі еволюції протягом десяти поколінь було отримано архітектуру згорткової нейронної мережі з покращеними узагальнювальними властивостями.

Порівняльний аналіз результатів класифікації показав, що згорткова нейронна мережа з архітектурою, оптимізованою за допомогою розробленого генетичного алгоритму, забезпечує суттєве підвищення точності при роботі з реальними даними. Зокрема, точність класифікації зросла з 65 % для базової архітектури до 97–99 % для оптимізованої моделі, що свідчить про високу ефективність застосування еволюційної оптимізації структури нейронної мережі.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення функціональних можливостей розробленого генетичного алгоритму шляхом включення багатокритеріальної оптимізації, зокрема з урахуванням

```

In [22]: class Genetic:

    def __init__(self, pop_size, nlayers, max_nfilters, max_sfilters):
        self.pop_size = pop_size
        self.nlayers = nlayers
        self.max_nfilters = max_nfilters
        self.max_sfilters = max_sfilters
        self.max_acc = 0
        self.best_arch = np.zeros((1,6))
        self.gen_acc = []

    def generate_population(self):
        np.random.seed(0)
        pop_nlayers = np.random.randint(1, self.max_nfilters, (self.pop_size, self.nlayers))
        pop_sfilters = np.random.randint(1, self.max_sfilters, (self.pop_size, self.nlayers))
        pop_total = np.concatenate((pop_nlayers, pop_sfilters), axis=1)
        return pop_total

    def select_parents(self, pop, nparents, fitness):
        parents = np.zeros((nparents, pop.shape[1]))
        for i in range(nparents):
            best = np.argmax(fitness)
            parents[i] = pop[best]
            fitness[best] = -99999
        return parents

    def crossover(self, parents):
        nchild = self.pop_size - parents.shape[0]
        nparents = parents.shape[0]
        child = np.zeros((nchild, parents.shape[1]))
        for i in range(nchild):
            first = i % nparents
            second = (i+1) % nparents
            child[i, :2] = parents[first][:2]
            child[i, 2] = parents[second][2]
            child[i, 3:5] = parents[first][3:5]
            child[i, 5] = parents[second][5]
        return child

    def mutation(self, child):
        for i in range(child.shape[0]):
            val = np.random.randint(1,6)
            ind = np.random.randint(1,4) - 1
            if child[i][ind] + val > 100:
                child[i][ind] -= val
            else:
                child[i][ind] += val
            val = np.random.randint(1,4)
            ind = np.random.randint(4,7) - 1
            if child[i][ind] + val > 20:
                child[i][ind] -= val
            else:
                child[i][ind] += val
        return child

    def fitness(self, pop, X, Y, epochs):
        pop_acc = []
        for i in range(pop.shape[0]):
            nfilters = pop[i][0:3]
            sfilters = pop[i][3:]
            model = CNN(nfilters, sfilters)
            H = model.fit(X, Y, batch_size=32, epochs=epochs)
            acc = H.history['accuracy']
            pop_acc.append(max(acc)*100)
        if max(pop_acc) > self.max_acc:
            self.max_acc = max(pop_acc)
            self.best_arch = pop[np.argmax(pop_acc)]
        self.gen_acc.append(max(pop_acc))
        return pop_acc

```

Рис. 4. Реалізація генетичного алгоритму для оптимізації архітектури згорткової нейронної мережі

не лише точності класифікації, але й обчислювальної складності, часу навчання та обсягу використаних ресурсів.

Перспективним напрямом є адаптація запропонованого підходу до інших задач комп'ютерного зору, таких як виявлення об'єктів і сегментація зображень, а також дослідження його ефективності при роботі з більшими та більш різномірними наборами реальних даних.

Доцільним є також дослідження можливості поєднання генетичного алгоритму з іншими методами автоматизованого проєктування нейронних мереж, зокрема підходами Neural Architecture Search, що може забезпечити подальше підвищення ефективності та стабільності результатів

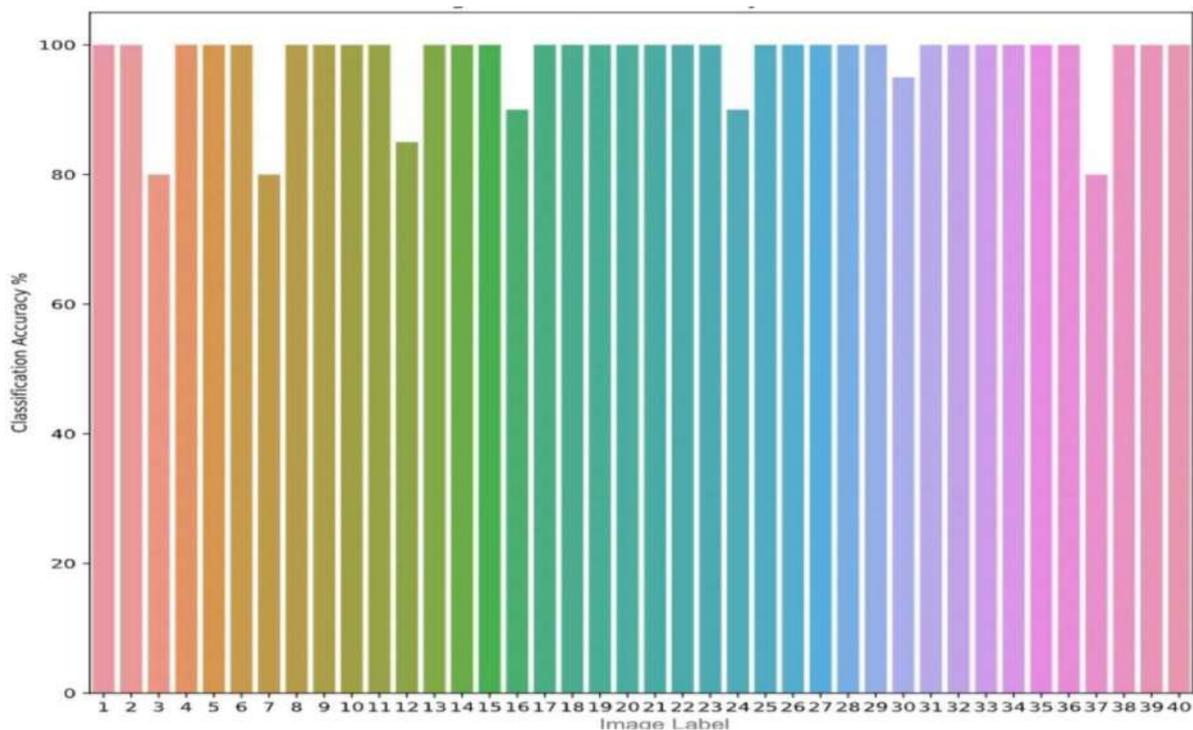


Рис. 5. Точність розпізнавання зображень оптимізованою згортковою нейронною мережею за допомогою генетичного алгоритму

Individuals Per Population	10
Number of Generations	10
Maximum No. Of Filters	100
Maximum size of Kernels	20
No. Of Parents and Children	5 each

Рис. 6. Параметри ініціалізації генетичного алгоритму

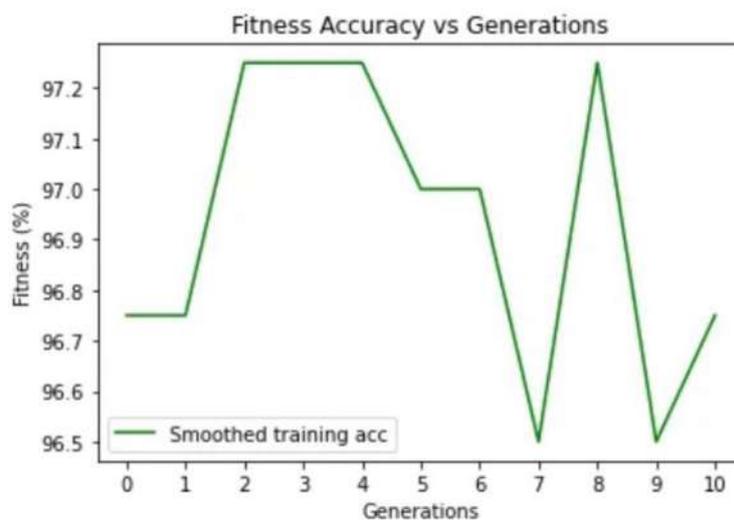


Рис. 7. Динаміку зміни функції пристосованості залежно від номера покоління генетичного алгоритму

Список використаних джерел:

1. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep Learning. *Nature*. 2015. Vol. 521. P. 436–444. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature14539> (дата звернення: 05.01.2026)
2. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2012. Vol. 25. P. 1097–1105. URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2012/file/c399862d3b9d6b76c8436e924a68c45b-Paper.pdf> (дата звернення: 05.01.2026)
3. Holland J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence. Ann Arbor: *University of Michigan Press*, 1992. 183 p. DOI: <https://doi.org/10.7551/mitpress/1090.001.0001> (дата звернення: 05.01.2026)
4. Stanley K. O., Miikkulainen R. Evolving Neural Networks through Augmenting Topologies. *Evolutionary Computation*. 2002. Vol. 10, No. 2. P. 99–127. DOI: <https://doi.org/10.1162/106365602320169811> (дата звернення: 05.01.2026)
5. Xie L., Yuille A. Genetic CNN. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. 2017. P. 1379–1388. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.154> (дата звернення: 05.01.2026)
6. Elsken T., Metzen J. H., Hutter F. Neural Architecture Search: A Survey. *Journal of Machine Learning Research*. 2019. Vol. 20, No. 55. P. 1–21. URL: <https://www.jmlr.org/papers/volume20/18-598/18-598.pdf> (дата звернення: 05.01.2026)
7. Зінченко, А. Ю., Хайдуров, В. В. (2024). Покращення розпізнавання структурованого тексту нейронною мережею YOLO. *Системи та технології*, вип. 68 (2), 2024, с. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.3> (дата звернення: 05.01.2026)

References:

1. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep Learning. *Nature*. 2015. Vol. 521. P. 436–444. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature14539> (accessed on: 05.01.2026).
2. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2012. Vol. 25. P. 1097–1105. Retrieved from: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2012/file/c399862d3b9d6b76c8436e924a68c45b-Paper.pdf> (accessed on: 05.01.2026).
3. Holland J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence. Ann Arbor: *University of Michigan Press*, 1992. 183 p. DOI: <https://doi.org/10.7551/mitpress/1090.001.0001> (accessed on: 05.01.2026).
4. Stanley K. O., Miikkulainen R. Evolving Neural Networks through Augmenting Topologies. *Evolutionary Computation*. 2002. Vol. 10, No. 2. P. 99–127. DOI: <https://doi.org/10.1162/106365602320169811> (accessed on: 05.01.2026).
5. Xie L., Yuille A. Genetic CNN. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. 2017. P. 1379–1388. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.154> (accessed on: 05.01.2026).
6. Elsken T., Metzen J. H., Hutter F. Neural Architecture Search: A Survey. *Journal of Machine Learning Research*. 2019. Vol. 20, No. 55. P. 1–21. Retrieved from: <https://www.jmlr.org/papers/volume20/18-598/18-598.pdf> (accessed on: 05.01.2026).
7. Zinchenko A. Yu., Khaidurov, V. V. Pokrashchennia rozpiznavannia strukturovanoho tekstu neuronnoiu merezheiu YOLO [Improving structured text recognition with the YOLO neural network]. *Systemy ta tekhnologii*. vyp. 68 (2), 2024, s. 23–31 DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.3> (accessed on: 05.01.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 30.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Опубліковано: 00.00.2025

УДК 004.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2026-1-71.9>

Крамар Ю. М., кандидат технічних наук,
доцент кафедри інформатики та програмної інженерії
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-7456-726X

Вітківська І. І., старший викладач кафедри
інформатики та програмної інженерії
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-9453-9423

Жаріков Е. В., доктор технічних наук,
професор кафедри інформатики та програмної інженерії
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-1811-9336

Радіонов П. Ю., кандидат економічних наук,
доцент кафедри інформатики та програмної інженерії
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-7164-4458

МЕТОД ФОРМУВАННЯ ГРУП А/В-ТЕСТІВ ІЗ МІНІМАЛЬНИМ ВЗАЄМНИМ ВПЛИВОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АЛГОРИТМУ СТОЕРА–ВАГНЕРА

У статті розглядаються сучасні методи формування експериментальних груп для А/В-тестів у цифрових продуктах з урахуванням мінімізації взаємного впливу між учасниками та запобігання spillover-ефектам. Проблема неконтрольованої взаємодії користувачів стає особливо актуальною в умовах масштабних соціальних платформ і висококонективних графів, де поведінка одного індивіда може непрямо впливати на поведінку інших, спотворюючи результати експерименту та знижуючи достовірність висновків. У статті здійснено огляд ключових підходів, що застосовуються у практиці А/В-тестування, включно з кластерною рандомізацією, географічними експериментами та методами стабілізації оцінок у мережесих структурах. Додатково проаналізовано практичні рішення, які використовують Meta та Google для зменшення міжкористувацьких перетинів та покращення чистоти експериментів, зокрема формування стійких кластерів взаємодії та застосування багаторівневого рандомізаційного дизайну.

У роботі запропоновано метод, що ґрунтується на поданні користувачів як графа взаємодії та подальшому формуванні експериментальних груп на основі знаходження мінімального розрізу. Для обчислення оптимального розбиття використано алгоритм Стоера–Вагнера, який забезпечує глобально мінімальний розріз неорієнтованого графа та дозволяє автоматично визначати групи з найменшим можливим міжгруповим впливом. Такий підхід природно відображає реальну структуру соціальних взаємодій і придатний для застосування в системах із мільйонами користувачів. Наведено приклади ваг ребер взаємодій та інтерпретації отриманих кластерів у контексті оцінки spillover-ефектів. Запропонований метод поєднує строгий математичний апарат і практичну релевантність, узгоджуючись із сучасними індустріальними практиками провідних технологічних компаній та забезпечуючи підвищення точності й надійності А/В-експериментів у мережесих середовищах.

Ключові слова: А/В-тест, spillover-ефект, кластеризація, гео-рандомізація, поведінкове групування.

Kramar Yu. M., Vitkovska I. I., Zharikov E. V., Radionov P. Yu. Method for forming A/B test groups with minimal interference using the Stoer–Wagner algorithm

This article examines contemporary methods for constructing experimental groups in A/B testing for digital products, with a specific focus on minimizing mutual interference between participants and reducing spillover effects arising from social or behavioral interactions. The challenge of uncontrolled user-to-user influence has grown increasingly important in highly connected online environments, where actions, recommendations, and shared content can propagate across a network and distort



© Ю. М. Крамар, І. І. Вітківська, Е. В. Жаріков, П. Ю. Радіонов, 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

the measured impact of an experimental treatment. Such interference undermines the validity of causal inference and often leads to biased or unstable conclusions about product performance.

The paper provides an overview of established approaches, including cluster-based randomization, geographic experiments, and hierarchical assignment strategies, as well as practical implementations widely adopted by leading technology companies such as Meta and Google. These organizations regularly face large-scale network effects and have developed robust methodologies to ensure reliable experimentation even when user interactions cannot be ignored.

A central contribution of the article is the introduction of a graph-based method for constructing experimental groups. In this approach, users are represented as nodes within an interaction graph, and the strength of their connections reflects the probability or intensity of potential interference. Group formation is achieved through identifying a minimum cut in this graph, computed using the Stoer–Wagner algorithm. This algorithm enables efficient and scalable partitioning of large networks while guaranteeing an optimally minimal sum of cross-group connections. As a result, the proposed method effectively reduces spillover effects and significantly improves the internal validity of A/B tests.

The advantages of minimum-cut partitioning include natural alignment with real-world interaction patterns, suitability for graphs containing millions of users, reduced risk of contamination between treatment and control groups, and consistency with experimentation frameworks observed in industry practice. These benefits underscore the relevance and applicability of graph-based experimental design for modern digital ecosystems.

Key words: A/B testing, spillover effect, clustering, geo-randomization, behavioral grouping.

Постановка проблеми. А/В-тестування – один з найважливіших інструментів вимірювання ефективності змін у цифрових продуктах. Його класична модель передбачає, що користувачі незалежні між собою, а учасники експериментальних груп не впливають одне на одного. Однак сучасні інтернет-платформи є мережевими: користувачі взаємодіють, коментують, діляться контентом, змагаються за спільні ресурси або рекламу. У таких умовах незалежність порушується, а результати А/В-тесту можуть спотворюватися. Це робить звичайні методи випадкового розбиття недостатніми.

Це спотворення називається spillover-ефектом – ситуацією, коли зміна, застосована до однієї групи користувачів, побічно впливає на поведінку користувачів іншої групи [1, 2]. Наприклад, якщо користувач з групи А поширює контент у соціальній мережі, то друзі з групи В можуть побачити наслідки експерименту, хоча вони не є його учасниками.

Соціальні мережі (Meta), рекомендаційні системи (YouTube), рекламні ринки (Google Ads) та інтерактивні платформи мають сильну мережеву природу. У таких випадках spillover-ефекти – це дуже розповсюджена і звичайна річ. Саме тому сучасні технологічні компанії (Meta, Google, Amazon, TikTok) активно розвивають та застосовують методи, які дозволяють формувати ізольовані експериментальні групи, мінімізуючи взаємний вплив [3–9]. Ці методи варіюють від гео-рандомізації до складних алгоритмів розбиття графів.

Отже, у статті розглядаються загальні підходи та їхня практична реалізація, а також пропонується один із методів – формування груп через пошук мінімального розрізу на графі взаємодій за допомогою алгоритму Стоера–Вагнера [10].

Методи мінімізації взаємного впливу між групами А/В-тестів

Розглянемо поширені методи мінімізації взаємного впливу між групами А/В-тестів та випадки їх використання.

1. Географічна рандомізація (Geo-experiments)

Метод базується на розбитті користувачів не індивідуально, а агреговано – за регіонами, домогосподарствами або DMA-зонами. Цей метод використовується компанією Google у власних продуктах: Google Ads (оцінка змін в аукціонах), YouTube (регіональні зміни рекомендацій), Google Maps (тестування локальних функцій) [3, 4].

Перевагою методу є мінімальні перетини між геокластерами, що призводить до зменшення spillover-ефекту.

2. Кластеризація соціального графа

Компанія Meta широко застосовує розбиття користувачів на спільноти за допомогою алгоритмів Louvain, Leiden, METIS [6, 7]. В основі цих алгоритмів лежить ідея, що кластер являє собою групу користувачів, які щільно взаємодіють, а експериментальні групи формуються за принципом «кластер-до-групи», а не «користувач-до-групи».

Метод дає змогу уникнути змішування тісно пов'язаних користувачів, зменшити вплив поведінки друзів на результати тесту, коректно вимірювати ефекти у стрічці новин (Feed).

3. Двоступенева мережева рандомізація (Two-stage randomization)

Компанія Meta застосовує цей метод у складних мережевих експериментах: на першому етапі обираються кластери/спільноти, що братимуть участь у тесті; на другому – усередині частини кластерів рандомізують користувачів [8, 9].

Метод дозволяє вимірювати прямі ефекти (на користувача), непрямі ефекти (через друзів)

4. Розбиття на основі поведінкових або структурних ознак

Компанії Google і Meta застосовують наступні моделі: спільні пристрої (household graph), переглядові подібності (view graph у YouTube), модельовані вектори поведінки (embeddings) [3, 4, 8, 9].

Ціль розбиття: користувачі з високою кореляцією поведінки повинні або бути в одній групі, або не мати перетинів.

Практичне застосування методів мінімізації взаємного впливу

Як приклад, компанія Meta виконала ряд експериментів на соціальному графі [5]. При тестуванні алгоритму ранжування стрічки потрібно було контролювати мережевий вплив. Для цього побудовано граф взаємодій користувачів, виконано його кластеризацію, проведено експерименти на рівні кластерів.

Такий підхід дозволив уникнути ситуації, коли контент із експериментальної групи з'являється у стрічці користувача з контрольної.

Ще один приклад від компанії Google, що використала гео-тести та графи рекламодавців [3, 4]. У Google Ads рекламодавці конкурують в одних аукціонах і їх неможливо незалежно рандомізувати. Тому застосовуються geo-split тестування та графове розбиття рекламодавців за допомогою METIS [7].

Такий підхід дозволив мінімізувати перетин між рекламодавцями у групах.

Всі наведені у статті методи – кластеризація, гео-рандомізація, поведінкове групування – мають на меті мінімізувати кількість або силу зв'язків між експериментальними групами і застосовуються досить успішно. Але найбільш формалізованим, математично обґрунтованим способом реалізувати цю мету є побудова графу взаємодій користувачів та знаходження на ньому глобального мінімізованого розрізу між двома підмножинами.

Графовий метод мінімального розрізу є ефективним у випадку, коли: система мережево структурована; є вимірні взаємодії між користувачами; spillover-ефекти значні та вимірювані.

Саме цей підхід добре масштабується на соціальні графи, графи спільних переглядів, графи пристроїв, графи конкуренції рекламодавців і забезпечує формально мінімальний spillover – ефект.

Метод формування груп на основі графа взаємодій

Метод базується на представленні користувачів як графа взаємодій для формування груп через мінімальний розріз.

1. Побудова графа.

Нехай є граф

$$G = (V, E, w), \quad (1)$$

де V – множина користувачів; E – множина ребер (факт взаємодії); $w(u, v)$ – вага ребра, що відображає силу впливу.

Розглянемо приклад ваги ребра $w(u, v)$, в якому між користувачами u і v існують такі взаємодії за останні 7 днів:

- користувачі написали один одному 5 повідомлень (вплив взаємодії визначимо, наприклад, як 0.6);
- 3 рази відмітили (поставили «like») один одному пости (вплив – 0.3);
- 2 рази переглядали профіль один одного (вплив – 0.1);
- 1 раз поширили спільний контент.

Тоді вагу можна визначити як:

$$w(u, v) = 0.6 \cdot \text{messages}(u, v) + 0.3 \cdot \text{likes}(u, v) + 0.1 \cdot \text{profile_views}(u, v). \quad (2)$$

Підставимо в формулу значення:

$$w(u, v) = 0.6 \cdot 5 + 0.3 \cdot 3 + 0.1 \cdot 2 = 3 + 0.9 + 0.2 = 4.1.$$

Таким чином, ребро (u, v) матиме вагу 4.1, що означає відносно сильний взаємний вплив, тому небажано розділяти користувачів u і v між експериментальними групами.

2. Пошук мінімального розрізу

Потрібно знайти такі множини S і T , що:

$$\text{cut}(S, T) = \sum_{\{u \in S, v \in T\}} w(u, v). \quad (3)$$

Мінімальний розріз надає мінімальний взаємний вплив. Для вирішення задачі пошуку мінімального розрізу в даній статті пропонується використати алгоритм Стоера–Вагнера [6].

Знаходження глобального мінімізованого розрізу алгоритмом Стоера–Вагнера

Алгоритм Стоера–Вагнера (Stoer–Wagner Minimum Cut Algorithm) – це детермінований алгоритм для знаходження глобального мінімального розрізу у зваженому ненаправленому графі. Алгоритм забезпечує оптимальний результат та є одним із ефективних вирішень для задач такого типу [10].

Мінімальний розріз – це спосіб розділити граф на дві частини так, щоб сумарна вага «розірваних» ребер була мінімальною.

Алгоритм працює методом багаторазового «стягування» графа, відповідно до якого:

- виконується пошук пари вершин, між якими найбільший зв'язок, збільшуючи набір вершин (A) у певному порядку;
- останні дві додані вершини вважаються кандидатним мінімальним розрізом;
- вище вказані дві вершини зливаються, утворюючи одну нову вершину;

- процес повторюється, доки в графі не залишиться одна вершина;
- кращий розріз серед усіх ітерацій – і є глобальний мінімальний розріз.

Розглянемо формальне визначення алгоритму Стоера–Вагнера.

Нехай є граф (описаний вище), $G = (V, E, w)$, де $w(u, v)$ – вага ребра між вершинами (u) і (v) .

Алгоритм складається з $n - 1$ фаз (ітерацій) (де n – це кількість вершин).

Фазу алгоритму представлено послідовністю дій:

- задаємо початкову множину A : $A = \{\text{довільна вершина}\}$;
- поступово додаємо найбільш зв'язані вершини. На кожному кроці додається вершина, яка має найбільшу сумарну вагу зв'язків до поточного набору (A) ;
- знаходимо останні дві додані вершини, та позначимо їх як (s) і (t) (останньою додається (t)), тоді множина, що містить тільки (t) , описує кандидатний розріз

$$cut_t = \sum_{u \in A'} w(u, t), \quad (4)$$

де (A') – всі вершини, додані до (A) до (t) ;

- оновлюємо найкращий мінімальний розріз. Якщо cut_t найменший з усіх фаз, то зберігаємо його;
- зливаємо вершини (s) і (t) . Це зменшує кількість вершин у графі та створює новий агрегований вузол з вагами:

$$w'(u, st) = w(u, s) + w(u, t);$$

- переходимо до наступної фази (тобто робимо ітерацію всіх кроків), поки не залишиться 1 вершина.

В результаті виконання алгоритму отримуємо:

- множини вершин S і T , які задають мінімальний розріз,
- значення ваги цього розрізу, що є сумою перетнутих ребер.

Особливості алгоритму Стоера–Вагнера:

- алгоритм виявляє «щільно зв'язані групи» через поступове додавання найсильніших зв'язків;
- у момент, коли додається остання вершина (t) , вона має найменший зв'язок із зовнішніми вершинами, тому розріз, що відокремлює її, є кандидатом на мінімальний;
- багаторазове злиття вершин не порушує структуру мінімального розрізу, оскільки агрегована вершина зберігає сумарну силу зв'язків;
- перебір проводиться у всіх фазах, що гарантує знаходження глобального мінімуму.

Перевагами методу мінімального розрізу є:

- мінімальний можливий міжгруповий вплив;
- природне відображення реальної структури взаємодій;
- здатність застосовуватись до великих графів (мільйони користувачів);
- узгодженість з практиками Meta та Google.

Висновки. У сучасних цифрових системах взаємний вплив між користувачами є ключовою проблемою А/В-тестування. Існуючі практики Meta та Google – гео-рандомізація, кластеризація соціальних графів, двоступенева мережева рандомізація – демонструють потребу у методах, що враховують мережеву природу продуктів.

Найбільш універсальним і математично строгим підходом є представлення користувачів як графа взаємодій та формування груп через мінімальний розріз. Алгоритм Стоера–Вагнера дозволяє знаходити оптимальне розбиття, що мінімізує spillover-ефекти та забезпечує високу якість експерименту.

Інтеграція цього методу у практику А/В-тестування створює потужний інструмент для побудови ізолюваних, незалежних і статистично валідних експериментальних груп.

Список використаних джерел:

1. Xu Y. From Infrastructure to Culture: A/B Testing Challenges in Large Scale Social Networks / Xu Y., Nanyu Ch., Fernandez A., Sinno O., Bhasin A. 2015. URL: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/2783258.2788602>
2. Holmström Olsson H. Experimentation that Matters: A Multi-case Study on the Challenges with A/B Testing. Holmström Olsson H., Bosch J., Fabijan A. 2017. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-69191-6_12
3. Vaver J. Measuring Ad Effectiveness Using Geo Experiments. Vaver J., Koehler J. Google. URL: <https://static.googleusercontent.com/media/research.google.com/en/pubs/archive/38355.pdf>
4. Kerman J. Estimating Ad Effectiveness using Geo Experiments in a Time-Based Regression Framework. Kerman J., Wang P., Vaver J. Google. URL: <https://static.googleusercontent.com/media/research.google.com/en/pubs/archive/45950.pdf>
5. Karrer B. Network experimentation at scale. Karrer B., Shi L., Bhole M., Goldman M., Palmer T., Gelman C., Konutgan M., Sun F. Cornell University, 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2012.08591>

-
6. Karypis G. A Fast and High Quality Multilevel Scheme for Partitioning Irregular Graphs. Karypis G., Kumar V. *SIAM Journal on Scientific Computing*. 1998. Т. 20, № 1. С. 359–392. <https://doi.org/10.1137/S1064827595287997>
 7. Blondel V. D. Fast Unfolding of Communities in Large Networks. Blondel, V. D., & Guillaume, J. L. *Journal of Statistical Mechanics*. 2008. Режим <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2008/10/P10008>
 8. How Meta tests products with strong network effects. URL: <https://medium.com/%40AnalyticsAtMeta/how-meta-tests-products-with-strong-network-effects-96003a056c2c>.
 9. Testing Product Changes with Network Effects. URL: <https://research.facebook.com/blog/2021/8/testing-product-changes-with-network-effects>
 10. Stoer M. A simple min-cut algorithm. / Stoer M., Wagner F. *Journal of the ACM*. 1997. Т. 44, № 4. С. 585–591. <https://doi.org/10.1145/263867.263872>

References:

1. Xu, Y., Nanyu, C., Fernandez, A., Sinno, O., & Bhasin, A. (2015). From infrastructure to culture: A/B testing challenges in large scale social networks. *KDD '15: The 21th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Retrieved from: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/2783258.2788602>
2. Holmström Olsson, H., Bosch, J., & Fabijan, A. (2017). Experimentation that matters: A multi-case study on the challenges with A/B testing. *Software Business* (pp. 179–185). Retrieved from: https://doi.org/10.1007/978-3-319-69191-6_12
3. Vaver, J., & Koehler, J. (2011). Measuring ad effectiveness using geo experiments. *Google Research*. Retrieved from: <https://static.googleusercontent.com/media/research.google.com/en//pubs/archive/38355.pdf>
4. Kerman, J., Wang, P., & Vaver, J. (2017). Estimating ad effectiveness using geo experiments in a time-based regression framework. *Google Research*. Retrieved from: <https://static.googleusercontent.com/media/research.google.com/en//pubs/archive/45950.pdf>
5. Karrer, B., Shi, L., Bhole, M., Goldman, M., Palmer, T., Gelman, C., Konutgan, M., & Sun, F. (2020). Network experimentation at scale. *Cornell University arXiv*. Retrieved from: <https://arxiv.org/abs/2012.08591>
6. Karypis, G., & Kumar, V. (1998). A fast and high-quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 20(1), 359–392. <https://doi.org/10.1137/S1064827595287997>
7. Blondel, V. D., Guillaume, J.-L., Lambiotte, R., & Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2008(10), P10008. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2008/10/P10008>
8. Analytics at Meta. (2022). How Meta tests products with strong network effects. *Medium*. Retrieved from: <https://medium.com/@AnalyticsAtMeta/how-meta-tests-products-with-strong-network-effects-96003a056c2c>
9. Karrer B., Shi L., Bhole M. (2021). Testing product changes with network effects. *Meta Research*. Retrieved from: <https://research.facebook.com/blog/2021/8/testing-product-changes-with-network-effects/>
10. Stoer, M., & Wagner, F. (1997). A simple min-cut algorithm. *Journal of the ACM*, 44(4), 585–591. <https://doi.org/10.1145/263867.263872>

Дата першого надходження статті до видання: 23.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

Молчанова М. О., доктор філософії,
старший викладач кафедри комп'ютерних наук
Хмельницького національного університету
ORCID: 0000-0001-9810-936X

Андрощук В. І., здобувач вищої освіти кафедри комп'ютерних наук
Хмельницького національного університету
ORCID: 0009-0006-1910-7221

Шурипа М. О., здобувач вищої освіти кафедри комп'ютерних наук
Хмельницького національного університету
ORCID: 0009-0003-7025-4647

Мазурець О. В., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних наук
Хмельницького національного університету
ORCID: 0000-0002-8900-0650

ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНИЙ ПІДХІД ДО НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО ВИЯВЛЕННЯ СУБ'ЄКТІВ КІБЕРБУЛІНГУ ЗА ПОВІДОМЛЕННЯМИ У КЕРОВАНОМУ ХМАРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Метою роботи є формування та обґрунтування об'єктно-орієнтованого підходу до нейромережевого виявлення суб'єктів кібербулінгу за повідомленнями із поєднанням первинної детекції та подальшої синтаксико-семантичної інтерпретації у керованому хмарному середовищі. Запропоновано узгоджену архітектуру, у якій нейромережевий модуль здійснює фільтрацію повідомлень на рівні «кібербулінг / не кібербулінг», після чого результати проходять залежніший аналіз із реконструкцією рольових зв'язків типу «суб'єкт – дія – об'єкт». Об'єктну модель, що включає класи повідомлень, речень, токенів, залежностей, предикатів, рольових трійок і підсумкових структур, визначено як основу для забезпечення прозорої трасованості рішень, тоді як кероване хмарне середовище забезпечує відтворюваність запусків та масштабованість експериментів.

Експериментально підтверджено ефективність первинної детекції: модуль на основі BERT продемонстрував метрику $F1 = 0.98$ у двокласовій постановці («кібербулінг» / «не кібербулінг»), що свідчить про достатній рівень відсіву нерелевантних повідомлень перед рольовим аналізом. На експертно верифікованому підборі встановлено узгоджені показники якості рольової ідентифікації: для суб'єкта отримано значення 0.88, 0.86, 0.87 за Precision, Recall і F1 відповідно; для об'єкта – 0.85, 0.83, 0.84; для дієслівного центру – 0.91, 0.89, 0.90. Точне відновлення рольової трійки забезпечило значення $F1 = 0.76$. Міжекспертна узгодженість становила коефіцієнт Коена 0.82 при 87 % повної згоди, що засвідчує надійність еталонних міток і коректність застосованої процедури оцінювання. У спірних випадках використано третю допоміжну оцінку мовною моделлю із фіксованою інструкцією; фінальні мітки визначено за правилом більшості.

Отримано результати, які демонструють, що запропонований підхід не лише дає змогу визначити факт агресивної комунікації, а й забезпечує структуроване подання інформації про її адресність, залишаючись відтворюваним та аудитованим у практичних умовах. Сформовано висновки, що створюють підґрунтя для подальшої інтеграції підходу у модеративні системи й можливого розширення на корпуси з детальнішою рольовою розміткою та багатомовною підтримкою.

Ключові слова: кібербулінг, трансформерні моделі, синтаксико-семантичний аналіз, об'єктно-орієнтоване проектування, кероване хмарне середовище.

Molchanova M. O., Androshchuk V. I., Shurypa M. O., Mazurets O. V. Object-oriented approach to neural network-based detection of cyberbullying subjects from messages in a managed cloud environment

The aim of the work is to develop and substantiate an object-oriented approach to neural network detection of cyberbullying subjects from messages with a combination of primary detection and subsequent syntactic-semantic interpretation in a managed cloud environment. A coherent architecture is proposed in which the neural network module filters messages at the “cyberbullying / non-cyberbullying” level, after which the results undergo dependency analysis with the reconstruction of role relationships of the “subject – action – object” type. An object model, which includes classes of messages, sentences, tokens,



dependencies, predicates, role triples and summary structures, is defined as the basis for ensuring transparent traceability of decisions, while a managed cloud environment ensures the reproducibility of launches and scalability of experiments.

The effectiveness of the initial detection was experimentally confirmed: the BERT-based module demonstrated a metric of $F1 = 0.98$ in a two-class setting (“cyberbullying” / “not cyberbullying”), which indicates a sufficient level of screening out irrelevant messages before role analysis. Consistent indicators of the quality of role identification were established on the expert-verified subset: for the subject, values of 0.88, 0.86, 0.87 were obtained for Precision, Recall and F1, respectively; for the object – 0.85, 0.83, 0.84; for the verb center – 0.91, 0.89, 0.90. The exact restoration of the role triple provided a value of $F1 = 0.76$. The inter-expert agreement was Cohen’s coefficient of 0.82 with 87 % complete agreement, which indicates the reliability of the reference labels and the correctness of the applied evaluation procedure. In controversial cases, a third auxiliary assessment by a language model with a fixed instruction was used; the final labels were determined by majority rule.

The results obtained demonstrate that the proposed approach not only allows to determine the fact of aggressive communication, but also provides a structured presentation of information about its addressability, remaining reproducible and auditable in practical conditions. Conclusions are drawn that create a basis for further integration of the approach into moderation systems and possible expansion to corpora with more detailed role markup and multilingual support.

Key words: cyberbullying, transformer models, dependency parsing, object-oriented design, managed cloud.

Постановка проблеми. У сучасних цифрових комунікаціях кібербулінг набуває контекстно залежних і часто непрямих форм [1]. Переважна частина автоматизованих рішень обмежується бінарною класифікацією повідомлень на «агресивні/неагресивні», що не забезпечує встановлення адресності впливу – зокрема, ідентифікації ініціатора, цільової особи та характеру мовленнєвого акту [2]. Відсутність рольової інтерпретації ускладнює побудову адресних інтервенцій, аудит рішень і аналітичний супровід модераторів [3].

Актуальною є науково-практична задача розроблення багаторівневого підходу, який поєднує визначення наявності кібербулінгу [4] із подальшою реконструкцією суб’єктно-об’єктних зв’язків у висловлюваннях [5]. З інженерного погляду така задача потребує чіткої об’єктно-орієнтованої моделі предметної області, у якій повідомлення, речення, предикати та рольові трійки репрезентуються як окремі сутності із визначеними відповідальностями та інваріантами. Об’єктно-орієнтований підхід покликаний забезпечити модульність, розширюваність і тестованість багаторівневої обробки [6], від нейромережевої детекції ознак кібербулінгу до синтаксико-семантичного аналізу й інтерпретації ролей учасників.

Додаткові вимоги висуває обчислювальний контекст: результати мають бути відтворюваними та масштабованими у керованому хмарному середовищі, придатному для експериментів і прискореного інференсу [7]. Отже, постає потреба в методи та програмній реалізації, які поєднують нейромережеву детекцію з лінгвістично вмотивованою рольовою інтерпретацією, спираються на об’єктно-орієнтоване моделювання домену й забезпечують умови для подальшого оцінювання якості, продуктивності та практичної придатності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні корпусні ініціативи з автоматизованого аналізу агресивної комунікації демонструють перехід від бінарної детекції до ієрархічних та пояснювальних постановок. У межах OffensEval на базі таксономії OLID показано, що трансформерні моделі ефективні не лише для виявлення образливості, а й для подальшої категоризації та ідентифікації мішені. У першій ітерації завдання (2019) найкращі результати становили: $F1 = 0.829$ для підзадачі А (детекція образливості), $F1 = 0.755$ для підзадачі В (таргетована або нетаргетована образа) та $F1 = 0.660$ для підзадачі С (ідентифікація мішені IND/GRP/OTH). Підходи на основі BERT переважали серед лідерів [8]. Пояснювальна компонента була розвинена в SemEval 2021 Task 5 Toxic Spans, де метою стало виокремлення токсичних фрагментів на рівні символів. Найкраща команда досягла character $F1 = 70.83$ %, що підтвердило практичну реалізованість спан-рівневого раціоналізування рішень трансформерами. Водночас зафіксовано помітну варіативність якості: окремі системи на основі BiLSTM CRF або ToxicBERT демонстрували $F1$ на рівні 62.23 %, що вказує на складність спан-детекції та чутливість до архітектури і налаштувань [9].

Дослідження 2023 і 2024 років засвідчили конкурентоспроможність донавчання сучасних трансформерів у мовно і ресурсно обмежених сценаріях. Для бенгальської мови повідомлялося про $F1 = 0.87$ із використанням Bangla BERT або Multilingual BERT [10]. У домені мікроблогів окремі інженерні рішення на локальних твіттер-корпусах досягали $F1 = 0.91$ за специфічних експериментальних умов, що підтверджує важливість доменної адаптації [11]. Огляди узагальнюють стабільну перевагу sentence або cross encoder трансформерів над традиційними моделями і підкреслюють значення урахування сеансового контексту для підвищення надійності детекції [12].

Для пояснюваних рішень широке застосування отримав датасет HateXplain, який поєднує клас мови ворожнечі, ціль висловлювання та раціоналі. Це створює умови для спільного навчання детекції і інтерпретації (мішень і фрагмент) та підвищує довіру до модераторських систем [13, 14].

Підсумовуючи, наявні результати окреслюють зрілість трансформерних підходів у бінарній і багаторівневій класифікації, а також у раціоналізації на рівні спанів. Недостатньо опрацьованими залишаються аспекти переходу від класифікації і пояснення до відновлення повної рольової структури висловлювань та надійної ідентифікації суб’єктів впливу, а також питання відтворюваності і масштабування таких рішень у керованому хмарному середовищі. Саме ці елементи визначають подальший вектор дослідження.

Мета статті. Сформувати та обґрунтувати об'єктно-орієнтований підхід до нейромережевого виявлення суб'єктів кібербулінгу за повідомленнями, що поєднує первинне визначення наявності кібербулінгу із подальшою синтаксико-семантичною інтерпретацією і відновленням рольових зв'язків «суб'єкт-дія-об'єкт». Передбачено розроблення об'єктної моделі предметної області, опис алгоритмічних етапів обробки, реалізацію прототипу у керованому хмарному середовищі та експериментальне оцінювання якості і продуктивності з акцентом на відтворюваність і масштабованість.

Виклад основного матеріалу дослідження. Запропонований об'єктно-орієнтований підхід до нейромережевого виявлення суб'єктів кібербулінгу за повідомленнями реалізує послідовну обробку текстових даних у керованому хмарному середовищі (рисунок 1). На вхід подаються неструктуровані повідомлення, які розглядаються як потенційні носії агресивної комунікації. Перший етап передбачає нейромережеве визначення наявності кібербулінгу: модель класифікує висловлювання за ознаками образливості, цькування чи вербального тиску, що дозволяє виокремити лише ті фрагменти, які потребують подальшої інтерпретації.

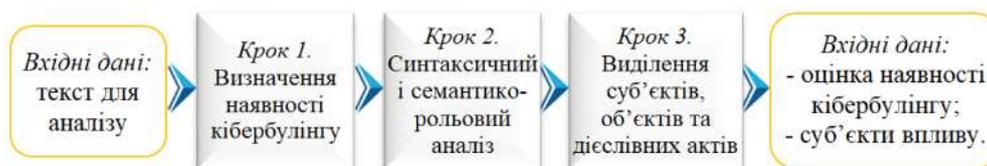


Рис. 1. Схема об'єктно-орієнтованого підходу до нейромережевого виявлення суб'єктів кібербулінгу

На наступному етапі здійснюється синтаксико-семантичний розбір повідомлень з реконструкцією граматичної структури та визначенням предикатів і лексичних носіїв дії. У межах об'єктно-орієнтованого подання домену відповідні сутності повідомлення, речення, предикат і рольова трійка використовуються для впорядкування результатів аналізу та їх подальшої інтерпретації.

Завершальний етап спрямований на встановлення суб'єктно-об'єктних відносин у висловлюваннях: визначається, хто ініціює мовленнєвий акт, на кого він спрямований і яким чином реалізується вплив.

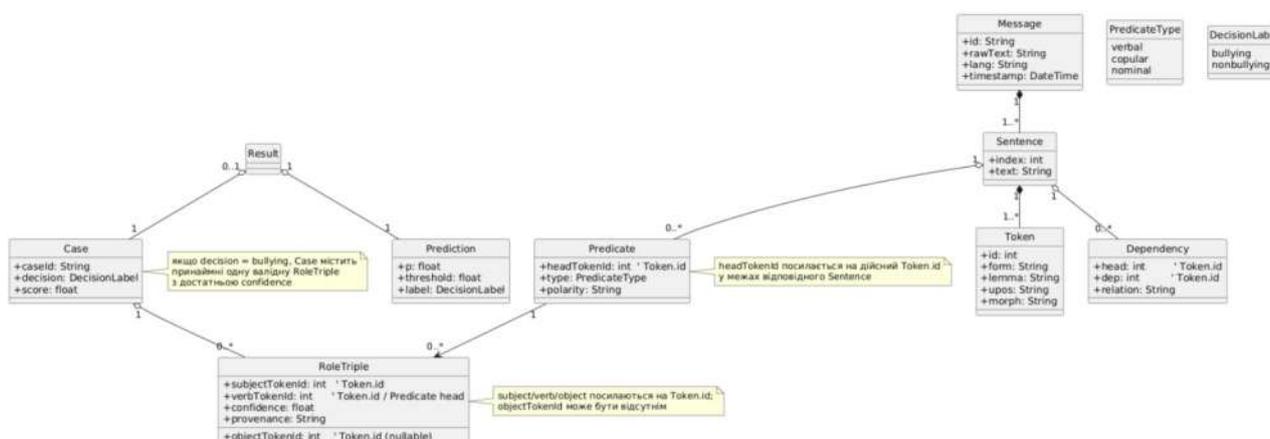


Рис. 2. UML-діаграма класів системи виявлення суб'єктів кібербулінгу за повідомленнями

Подана UML-модель (рисунок 2) формалізує об'єктно-орієнтоване подання задачі нейромережевого виявлення суб'єктів кібербулінгу у повідомленнях та відображає фактичну логіку реалізації. Вхідне повідомлення репрезентується класом «Message» із базовими метаданими; воно композиційно розчленовується на речення, кожне з яких містить токени й мережу залежностей, що задає синтаксичну структуру висловлювання. На цій структурі визначається предикат як ядро дії з фіксацією типу (дієслівний, копулярний або номінальний) і полярності. Така стратифікація рівнів, від тексту через речення і залежності до предиката забезпечує узгоджений перехід від поверхневої форми до змістової інтерпретації.

Рольова реконструкція реалізується через клас «RoleTriple», який фіксує трійку «суб'єкт, дія, об'єкт» з посиланнями на відповідні токени, а також зберігає впевненість і походження отриманих зв'язків. За наявності кількох актів мовленнєвого впливу трійки агрегуються у «Case», що містить підсумкове рішення та інтегральний бал і тим самим надає зручну одиницю для подальшого аналізу адресності. Первинне визначення факту кібербулінгу здійснюється нейромережевим класифікатором, результат якого акумулюється у класі «Prediction» у вигляді ймовірнісної оцінки, порогового значення та підсумкової мітки. Сукупний вихід конвеєра представлено класом «Result», який об'єднує рішення детектора з рольовою інтерпретацією у вигляді окремих трійок або цілісного випадку.

Запропонована об'єктна схема узгоджує дані і результати на всіх етапах обробки, дозволяє явно фіксувати посилання між рівнями представлення (від токенів до ролей) та забезпечує відтворюваність експериментів у керованому хмарному середовищі. Чітке розмежування сутностей і їхніх відповідальностей полегшує експериментальну валідацію, аудиту рішень і масштабування обробки, а також створює основу для подальшого оцінювання якості та продуктивності системи у прикладних сценаріях модератції.

Отримане структуроване подання випадку кібербулінгу поєднує факт агресії з чітко окресленою рольовою конфігурацією, що створює підґрунтя для аналізу адресності, динаміки взаємодій та подальшого практичного використання у керованому хмарному середовищі.

Запропонована архітектура виконання (рисунок 3) відображає розгортання підходу у керованому хмарному середовищі та структурована навколо єдиного Python-середовища, у межах якого функціонують основні компоненти обробки. Користувацький інтерфейс («UI/Demo») забезпечує подання вхідних повідомлень і перегляд результатів. Керування послідовністю етапів здійснює координатор обробки («Pipeline Coordinator»), який приймає повідомлення, ініціює первинне нейромережеве визначення наявності кібербулінгу, передає релевантні тексти на синтаксико-семантичний аналіз та збирає результати в узгодженому форматі.

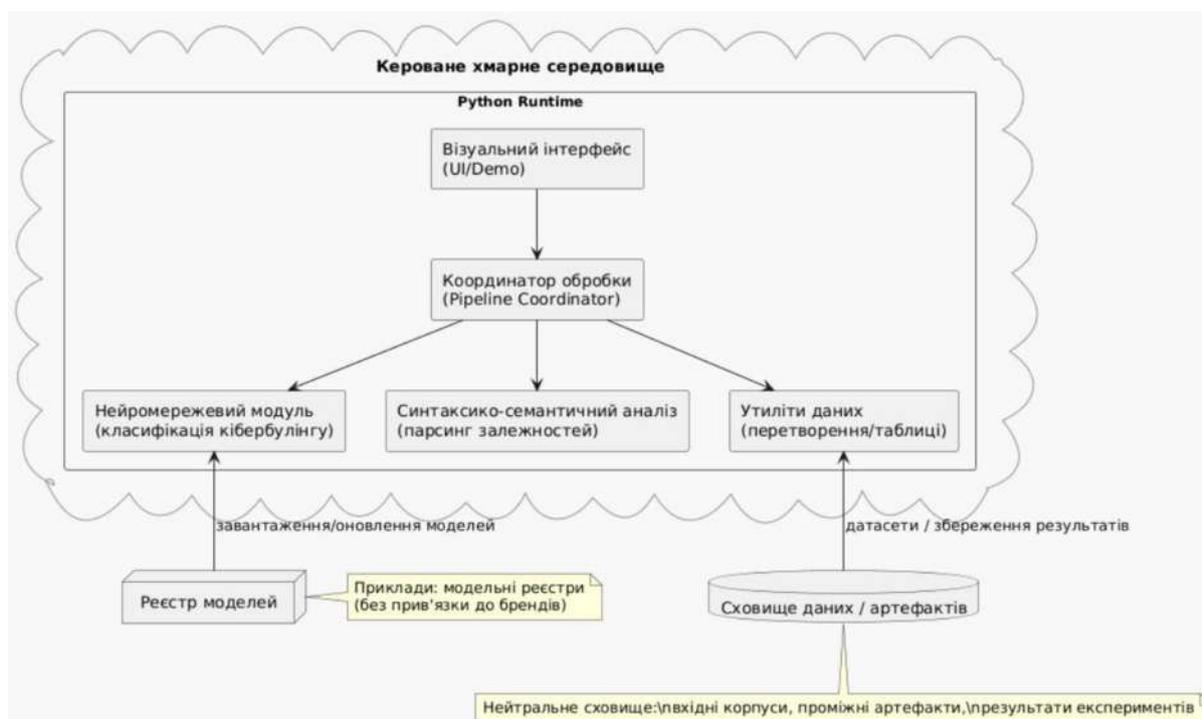


Рис. 3. Архітектура виконання у керованому хмарному середовищі

Нейромережевий модуль відповідає за класифікацію повідомлень щодо ознак кібербулінгу, повертаючи імовірнісне рішення, яке використовується як фільтр для подальшої інтерпретації. Блок синтаксико-семантичного аналізу виконує парсинг залежностей і формує підґрунтя для рольової реконструкції «суб'єкт-дія-об'єкт». Допоміжні утиліти даних здійснюють перетворення корпусів, формування підвибірок, кешування проміжних артефактів і підготовку підсумкових таблиць метрик, що спрощує відтворення експериментів.

Середовище взаємодіє з реєстром моделей, звідки здійснюється завантаження або оновлення модельних ваг та токенізаторів, і зі сховищем даних/артефактів, де розміщуються вхідні датасети, проміжні результати та підсумкові звіти. Така організація виключає прив'язку до конкретних сервісів, забезпечує контрольованість версій, можливість масштабування обчислень і прозоре трасування всіх кроків обробки від подання повідомлення до формування рішення про наявність кібербулінгу та отримання ролей учасників.

У роботі використано два відкриті корпуси: «Cyberbullying Classification» [15] та «Cyberbullying Detection» [16].

Корпус «Cyberbullying Classification» містить понад 47 тис. англійських твітів із розміткою за шістьма категоріями: вікова, етнічна, гендерна, релігійна належність, інші прояви агресії та «не кібербулінг». Розподіл класів близький до збалансованого, що робить набір зручним для навчання і валідації бінарного детектора (об'єднання всіх проявів агресії в позитивний клас). Корпус відображає природну мову мікроблогів (сленг, орфографічні варіації, короткі висловлювання), однак не містить розмітки суб'єктів і об'єктів, тож не придатний для кількісної валідації рольових трійок.

Набір об'єднує тексти з різних платформ і використовується для двокласової постановки «кібербулінг / не кібербулінг». Різноманітність джерел підвищує узагальнюючу здатність моделі в задачі первинної детекції, проте наявний дисбаланс класів і відсутня деталізація типів агресії чи її адресності. У цій роботі корпус застосовано як допоміжний для перевірки узагальнюваності детектора; кількісна оцінка рольової інтерпретації на ньому не проводилась через брак відповідної розмітки.

Через відсутність у використаних корпусах «золотого стандарту» для рольових зв'язків (хто ініціатор, на кого спрямовано дію, яка дія), валідацію результатів рольової інтерпретації здійснювали два галузеві експерти та GPT-5 [17] як допоміжний суддя. Такий підхід забезпечує поєднання фахової оцінки з відтвореною автоматизованою перевіркою.

Експерти незалежно анутовували для кожного тестового прикладу трійку суб'єкт-дія-об'єкт і робили вердикт щодо коректності відновлення ролей системою. Узгодженість фіксували показниками міжекспертної згоди (відсоток повної згоди). У випадках розбіжностей застосовували схему більшості: два з трьох суддів формували остаточне рішення. GPT-5 використовували як третю сторону з чітким інструктажем, що вимагав: (1) вказати знайдені ролі, (2) навести опорні фрагменти тексту, (3) пояснити причину відхилення, якщо система помилилась. Вихід GPT-5 мав дорадчий характер і не замінював людське рішення.

У відкритих наборах даних, використаних для навчання детектора, відсутня рольова розмітка, тому потрібний людський еталон для перевірки відновлення суб'єктів. В свою чергу, залучення GPT-5 як додаткового судді підвищує відтворюваність і допомагає виявляти пропуски або неоднозначності, що залишилися поза увагою експертів. Також, така трирівнева схема скорочує витрати на повну ручну розмітку, зберігаючи при цьому якість і прозорість: фінальний вердикт завжди формується або повною згодою експертів, або більшістю з трьох суддів із фіксацією обґрунтувань.

У підсумку, обрана стратегія оцінювання дозволяє коректно перевіряти саме якість відновлення суб'єктів/об'єктів і дій, не обмежуючись лише метриками детекції кібербулінгу, та водночас відповідає вимогам відтворюваності, заявленим у меті дослідження.

Нейромережевий модуль первинної детекції реалізовано на основі трансформерного енкодера типу BERT [17] із донавчанням під двокласову постановку «кібербулінг» / «не кібербулінг». Передобробка обмежувалася стандартною токенизацією; усі прояви агресивної комунікації було зведено до позитивного класу. Оцінювання виконували на валідаційному піднаборі зі стратифікованим поділом даних. Запуски проводили у керованому хмарному середовищі з GPU класу T4, із фіксацією випадкових зерен і версій модельних ваг, що забезпечує відтворюваність без прив'язки до конкретної платформи.

Рольова інтерпретація ґрунтувалася на залежнісному аналізі речень і реконструкції трійок «суб'єкт-дія-об'єкт». За відсутності еталонної рольової розмітки кількісні метрики для цього етапу доповнювали контрактними перевітками узгодженості (валідність посилань на токени, єдиність предиката в реченні, несуперечливість ролей) та експертним рецензуванням, описаним у відповідному підрозділі. Така схема мінімізує залежність від конкретних реалізацій і водночас дає змогу коректно інтерпретувати отримані результати.

Нейромережевий модуль первинної детекції продемонстрував $F_1 = 0.98$ на валідаційних даних у двокласовій постановці «кібербулінг» / «не кібербулінг».

Через відсутність у відкритих корпусах «золотого стандарту» для ролей якість відновлення суб'єктів/об'єктів і предикатів оцінювали на експертно перевіреному піднаборі. У таблиці 1 наведено узагальнені показники (відносно узгоджених міток більшості).

Таблиця 1

Метрики для виявлення суб'єктів кібербулінгу

Завдання	Показник
Визначення суб'єкта	Precision / Recall / F_1 : 0.88 / 0.86 / 0.87
Визначення об'єкта	Precision / Recall / F_1 : 0.85 / 0.83 / 0.84
Визначення дієслівного центру	Precision / Recall / F_1 : 0.91 / 0.89 / 0.90
Точне відновлення трійки	F_1 : 0.76

Перед узгодженням рішень зафіксовано Cohen's $\kappa = 0.82$ при повній згоді 87%. Це свідчить про високу відтворюваність критеріїв анутовання і достатню надійність отриманих оцінок. Використання GPT-5 як третього судді мало допоміжний характер: модель надавала пояснення й опорні фрагменти, що спрощувало вирішення спірних випадків і підвищувало прозорість процедури; фінальні мітки завжди визначалися перевагою більшості.

Спеціалізований конвеєр забезпечує детерміноване й відтворюване відновлення рольових зв'язків «суб'єкт-дія-об'єкт» з фіксованими порогами та контрактними перевітками, тож результати є аудитованими і придатними для регламентного використання. Натомість вихід GPT-5 суттєво залежить від версії та формулювання підказки, що ускладнює формальну верифікацію та дотримання нормативних вимог.

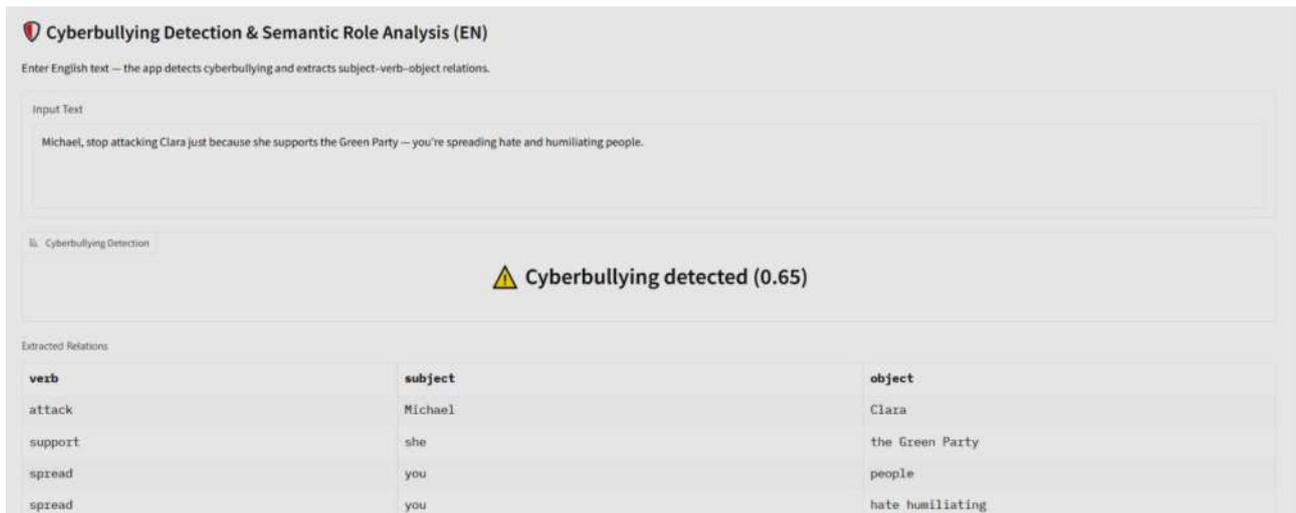


Рис. 4. Приклад роботи розробленого об'єктно-орієнтованого застосунку

Приклад роботи розробленого програмного забезпечення наведено на рисунку 4.

Запропонований об'єктно-орієнтований підхід забезпечує узгоджену послідовність обробки: від нейромережевої детекції кібербулінгу до синтаксико-семантичної реконструкції зв'язків «суб'єкт-дія-об'єкт», що реалізовано у керованому хмарному середовищі з фіксацією параметрів для відтворюваності. Архітектура та процедура оцінювання створюють передумови для масштабованого застосування у модераторських сценаріях і подальшого розширення на корпуси з детальною анотацією ролей.

Висновки. В межах проведеного дослідження було досягнуто поставлену мету: сформовано та обґрунтовано об'єктно-орієнтований підхід, у якому нейромережеве виявлення кібербулінгу поєднано з подальшою синтаксико-семантичною інтерпретацією й відновленням рольових зв'язків «суб'єкт-дія-об'єкт», з реалізацією у керованому хмарному середовищі. У межах двокласової постановки первинний модуль на основі BERT продемонстрував F_1 на рівні 0.98, що підтверджує достатній рівень фільтрації повідомлень перед рольовим аналізом. На експертно-перевіреному піднаборі відтворення ролей для визначення суб'єкта зафіксовано значення 0.88, 0.86, 0.87 за метриками Precision, Recall, F_1 відповідно, для об'єкта 0.85, 0.83, 0.84, а для дієслівного центру 0.91, 0.89, 0.90, тоді як точне відновлення трійки дало F_1 у розмірі 0.76. Міжекспертна узгодженість становила к Коена 0.82 при 87 % повної згоди, що підтверджує надійність еталонних міток і коректність процедури оцінювання. Сукупно результати свідчать, що запропонована архітектура забезпечує відтворюваність, аудитованість і практичну придатність: вона не лише фіксує факт агресивної комунікації, а й надає структуровану інформацію про адресність мовленнєвого впливу, створюючи підґрунтя для впровадження в модераторські системи та подальшого розширення на корпуси з детальною рольовою розміткою.

Список використаних джерел:

1. A Human-Centered Systematic Literature Review of Cyberbullying Detection Algorithms / S. Kim та ін. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*. 2021. Т. 5, CSCW2. С. 1–34. <https://doi.org/10.1145/3476066> (дата звернення: 07.11.2025).
2. Paul S., Saha S., Hasanuzzaman M. Identification of cyberbullying: A deep learning based multimodal approach. *Multimedia Tools and Applications*. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09631-w> (дата звернення: 07.11.2025).
3. Human Activity Recognition for the Identification of Bullying and Cyberbullying Using Smartphone Sensors / V. Gattulli et al. *Electronics*. 2023. Vol. 12, no. 2. P. 261. <https://doi.org/10.3390/electronics12020261> (дата звернення: 07.11.2025).
4. Method for neural network cyberbullying detection in text content with visual analytic / I. Krak et al. *CEUR Workshop Proceedings*. 2025. Vol. 3917, PP. 298–309. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3917/paper57.pdf> (дата звернення: 07.11.2025).
5. Method for cyberbullying neuronetwork detection using cloud services and object-oriented model / М. Молчанова та ін. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2024. Vol. 333, no. 2. P. 200–206. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-333-2> (дата звернення: 07.11.2025).
6. Verma R., Kumar K., Verma H. K. Code smell prioritization in object-oriented software systems: A systematic literature review. *Journal of Software: Evolution and Process*. 2023. <https://doi.org/10.1002/smr.2536> (дата звернення: 07.11.2025).

7. Load Balancing in cloud Environment: A State of-the-Art Review / Y. Lohumi et al. *IEEE Access*. 2023. P. 1. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3337146> (дата звернення: 07.11.2025).
8. OffensEval 2023: Offensive language identification in the age of Large Language Models / M. Zampieri et al. *Natural Language Engineering*. 2023. Vol. 29, no. 6. P. 1416–1435. <https://doi.org/10.1017/s1351324923000517> (дата звернення: 07.11.2025).
9. SemEval-2021 Task 5: Toxic Spans Detection / J. Pavlopoulos et al. *Proceedings of the 15th International Workshop on Semantic Evaluation (SemEval-2021)*, Online. Stroudsburg, PA, USA, 2021. <https://doi.org/10.18653/v1/2021.semeval-1.6> (дата звернення: 07.11.2025).
10. Sihab-Us-Sakib S., Rahman M. R., Forhad M. S. A., Aziz M. A. Cyberbullying detection of resource constrained language from social media using transformer-based approach. *Natural Language Processing Journal*. 2024. Vol. 9. Article No. 100104. <https://doi.org/10.1016/j.nlp.2024.100104> (дата звернення: 07.11.2025).
11. Aliyeva Ç. O., Yağanoğlu M. Deep learning approach to detect cyberbullying on twitter. *Multimedia Tools and Applications*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11042-024-19869-3> (дата звернення: 07.11.2025).
12. Yi P., Zubiaga A. Session-based cyberbullying detection in social media: A survey. *Online Social Networks and Media*. 2023. Vol. 36. P. 100250. <https://doi.org/10.1016/j.osnem.2023.100250> (дата звернення: 07.11.2025).
13. HateXplain: A Benchmark Dataset for Explainable Hate Speech Detection / B. Mathew et al. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2021. Vol. 35, no. 17. P. 14867–14875. <https://doi.org/10.1609/aaai.v35i17.17745> (дата звернення: 07.11.2025).
14. Hate-speech-CNERG/hatexplain · Datasets at Hugging Face. *Hugging Face – The AI community building the future*. URL: <https://huggingface.co/datasets/Hate-speech-CNERG/hatexplain> (дата звернення: 07.11.2025).
15. Cyberbullying Classification. *Kaggle*. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/andrewmvd/cyberbullying-classification> (дата звернення: 07.11.2025).
16. Cyberbullying Detection. *Kaggle*. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/gbiamgaurav/cyberbullying-detection> (дата звернення: 07.11.2025).
17. GPT-5. OpenAI. URL: <https://openai.com/gpt-5/> (дата звернення: 07.11.2025).
18. BERT applications in natural language processing: a review / N. M. Gardazi et al. *Artificial Intelligence Review*. 2025. Vol. 58, no. 6. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11162-5> (дата звернення: 07.11.2025).

References:

1. Kim, S., et al. (2021). A human-centered systematic literature review of cyberbullying detection algorithms. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 5(CSCW2), 1–34. <https://doi.org/10.1145/3476066>
2. Paul, S., Saha, S., & Hasanuzzaman, M. (2020). Identification of cyberbullying: A deep learning-based multimodal approach. *Multimedia Tools and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09631-w>
3. Gattulli, V., et al. (2023). Human activity recognition for the identification of bullying and cyberbullying using smartphone sensors. *Electronics*, 12(2), 261. <https://doi.org/10.3390/electronics12020261>
4. Krak I., et al. (2025). Method for neural network cyberbullying detection in text content with visual analytic. *CEUR Workshop Proceedings*, 2025, vol. 3917, 298–309. Retrieved from: <https://ceur-ws.org/Vol-3917/paper57.pdf>
5. Molchanova, M., et al. (2024). Method for cyberbullying neuronetwork detection using cloud services and object-oriented model. *Herald of Khmelnytskyi National University: Technical Sciences*, 333(2), 200–206. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-333-2>
6. Verma, R., Kumar, K., & Verma, H. K. (2023). Code smell prioritization in object-oriented software systems: A systematic literature review. *Journal of Software: Evolution and Process*. <https://doi.org/10.1002/smr.2536>
7. Lohumi, Y., et al. (2023). Load balancing in cloud environment: A state-of-the-art review. *IEEE Access*, 1. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3337146>
8. Zampieri, M., et al. (2023). OffensEval 2023: Offensive language identification in the age of large language models. *Natural Language Engineering*, 29(6), 1416–1435. <https://doi.org/10.1017/s1351324923000517>
9. Pavlopoulos, J., et al. (2021). SemEval-2021 Task 5: Toxic spans detection. In *Proceedings of the 15th International Workshop on Semantic Evaluation (SemEval-2021)*. Stroudsburg, PA: Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/2021.semeval-1.6>
10. Sihab-Us-Sakib, S., Rahman, M. R., Forhad, M. S. A., & Aziz, M. A. (2024). Cyberbullying detection of resource-constrained language from social media using transformer-based approach. *Natural Language Processing Journal*, 9, 100104. <https://doi.org/10.1016/j.nlp.2024.100104>
11. Aliyeva, Ç. O., & Yağanoğlu, M. (2024). Deep learning approach to detect cyberbullying on Twitter. *Multimedia Tools and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s11042-024-19869-3>
12. Yi, P., & Zubiaga, A. (2023). Session-based cyberbullying detection in social media: A survey. *Online Social Networks and Media*, 36, 100250. <https://doi.org/10.1016/j.osnem.2023.100250>
13. Mathew, B., et al. (2021). HateXplain: A benchmark dataset for explainable hate speech detection. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 35(17), 14867–14875. <https://doi.org/10.1609/aaai.v35i17.17745>

-
14. Hate-speech-CNERG/hatexplain. (n.d.). Datasets at Hugging Face – The AI community building the future. Hugging Face. Retrieved from: <https://huggingface.co/datasets/Hate-speech-CNERG/hatexplain> (Accessed November 7, 2025)
 15. Cyberbullying Classification. (n.d.). *Kaggle*. Retrieved from: <https://www.kaggle.com/datasets/andrewmvd/cyberbullying-classification> (Accessed November 7, 2025)
 16. Cyberbullying Detection. (n.d.). *Kaggle*. Retrieved from: <https://www.kaggle.com/datasets/gbiamgaurav/cyberbullying-detection> (Accessed November 7, 2025)
 17. OpenAI. (2025). *GPT-5*. Retrieved from: <https://openai.com/gpt-5/> (Accessed November 7, 2025)
 18. Gardazi, N. M., et al. (2025). BERT applications in natural language processing: A review. *Artificial Intelligence Review*, 58(6). <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11162-5>

Дата першого надходження статті до видання: 09.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

Онищенко А. О., аспірант кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова
ORCID: 0009-0005-6721-5350 <mailto:anatoliy.litvinov@kname.edu.ua>

Бочаров Б. П., кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова
ORCID: 0000-0002-5324-6851

Костенко О. Б., кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова
ORCID: 0000-0001-9744-4377

ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОШУКОВОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ SVM: ДАНІ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВАЛІДАЦІЯ

Розроблено фреймворк для прогнозування ефективності втручань у пошукову оптимізацію (SEO) із використанням контрольованого машинного навчання на основі методів опорних векторів (SVM). Досліджено багатоджерельний набір даних, що охоплює внутрішні сигнали сторінки (контент, метадані, структуровані дані), зовнішні сигнали (авторитет зворотних посилань, розподіл анкорів та вагів) та технічну продуктивність (Core Web Vitals, індексація). Встановлено суворий протокол оцінювання на основі стратифікованої к-кратної крос-валідації, відкладеної вибірки та порівняння з базовими моделями (регуляризована логістична регресія), із підбором гіперпараметрів методом перебору сітки.

Виявлено стабільні предиктори SEO-ефекту для різнорідних сайтів і галузей. З'ясовано, що поєднання високої якості контенту, семантично узгодженого таргетингу ключових слів, авторитетного профілю зворотних посилань і належного технічного стану вебсторінок забезпечує найвищу ймовірність вимірюваних підвищення пошукових позицій, органічний трафік та високі конверсії. Установлено, що комбінація On-page оптимізації зі сталим залученням високоякісних посилань перевершує одноканальні стратегії, тоді як недостатня технічна продуктивність обмежує віддачу навіть за наявності сильних контентних або зовнішніх сигналів. Досліджено, що SVM із RBF-ядром досягає конкурентної точності та показників precision–recall порівняно з базовими підходами, демонструючи кращу стійкість за умов дисбалансу класів і зсувів розподілу.

Запропоновано робочий процес підтримки прийняття рішень, що пріоритезує дії з найбільшим впливом в умовах невизначеності, кількісно оцінює очікувані виграші з довірчими інтервалами та надає пояснення на рівні ознак для підтримки зацікавлених сторін. Удосконалено напрями подальших досліджень, які охоплюють каузальну ідентифікацію (наприклад, «ступінчасті» запуски та синтетичні контролю), стандартизоване звітування про SEO-втручання та відкриті репозитарії розмірів ефекту для підвищення відтворюваності й зовнішньої валідності.

Ключові слова: пошукова оптимізація, машинне навчання, SVM, ключові слова, зворотні посилання, ранжування, веб-аналітика.

Onyshchenko A. O., Bocharov B. P., Kostenko O. B. Prediction of seo effectiveness using SVM: data, modeling, and validation

Developed a data-driven framework for forecasting the effectiveness of search engine optimization (SEO) interventions using supervised machine learning with support vector machines (SVM). Investigated a multi-source dataset comprising on-page signals (content quality, metadata compliance, structured data), off-page signals (backlink authority, anchor distribution), and technical performance (Core Web Vitals, crawlability), with standardized preprocessing, feature scaling, and class-balance control. Established a rigorous evaluation protocol based on stratified k-fold cross-validation, hold-out testing, and comparative baselines (regularized logistic regression, random forests), with model selection via grid search.

Identified stable predictors of SEO uplift across heterogeneous sites and industries, revealing that the joint presence of high-quality content, semantically coherent keyword targeting, authoritative backlink profiles, and solid technical health



produces the highest probability of measurable gains in rankings, organic traffic, and conversions. Revealed that combining on-page optimization with sustained, high-authority link acquisition outperforms single-channel strategies, while insufficient technical performance constrains returns even under strong content or backlink signals. Determined that SVM with RBF kernel achieves competitive accuracy and precision–recall characteristics relative to baselines, with superior robustness under class imbalance and distributional shift.

Proposed a decision-support workflow that prioritizes high-leverage actions under uncertainty, quantifies expected gains with confidence intervals, and surfaces feature-level explanations to guide stakeholders. Outlined future research on causal identification (e.g., staggered rollouts and synthetic controls), standardized reporting of SEO interventions, and open effect-size repositories to improve reproducibility and external validity.

Key words: search engine optimization, machine learning, SVM, keywords, backlinks, ranking, web analytics.

Постановка проблеми. Незважаючи на значний прогрес у пошуковій оптимізації (SEO) та стали увагу до її впливу на видимість, органічний трафік і конверсії, сучасна міжнародна література фіксує суттєву різноманітність результатів і методологій оцінювання ефективності [1]. Поряд із накопиченням практичних кейсів і галузевих рекомендацій, зростає масив робіт, що застосовують машинне навчання для прогнозування результатів SEO за сукупністю on-page, off-page та технічних сигналів [2]. Водночас відсутність уніфікованих протоколів побудови вибірок, стандартів попередньої обробки, відтворюваних схем валідації та чітких правил звітування про втручання ускладнюють порівнянність висновків і переносимість моделей між доменами.

Актуальність цього дослідження зумовлена трьома нерозв'язаними проблемами: (i) нестачею відтворюваних, статистично коректних процедур оцінювання ефективності SEO-втручань; (ii) недостатньою інтеграцією технічних метрик (Core Web Vitals, індексаційні сигнали) з контентними та посилальними ознаками в єдиному прогнозному пайплайні; (iii) браком прозорих інструментів підтримки рішень, що дозволяють пріоритизувати дії за очікуваною віддачею та невизначеністю [4].

Постановка задачі полягає в побудові та валідації узагальнюваної моделі прогнозування результативності SEO-втручань на основі контрольованого навчання, яка поєднує стандартизовану підготовку даних, строгий протокол оцінювання та інтерпретовані висновки для практичного використання. Об'єктом дослідження є процес оцінювання та прогнозування ефективності SEO-кампаній за сукупністю показників вебресурсу. Предметом дослідження є методи і засоби машинного навчання (зокрема SVM) для передбачення приростів позицій, органічного трафіку та конверсії залежно від on-page, off-page і технічних факторів.

Метою роботи є розроблення відтворюваного прогнозного фреймворку для SEO, який забезпечує статистично обґрунтовану оцінку очікуваного ефекту втручань і надає підказки для пріоритизації дій. Для досягнення мети досліджено й систематизовано релевантні джерела даних; сформовано та уніфіковано набір ознак, що охоплює контентні, посилальні та технічні сигнали; спроектовано протокол навчання й оцінювання з крос-валідацією та порівнянням із базовими моделями; побудовано й налаштовано SVM-модель з добром гіперпараметрів; виконано аналіз чутливості та внеску ознак; розроблено робочий процес підтримки прийняття рішень для планування SEO-дій за умов невизначеності.

Матеріали і методи досліджень. Дослідження виконано як кількісне емпіричне моделювання з подальшою валідацією у постановці контрольованого навчання. Дані сформовано з багатьох джерел: on-page сигнали (якість контенту, відповідність метаданих, структуровані дані), off-page сигнали (профіль зворотних посилань, розподіл анкорів, авторитет доменів) і технічні показники (Core Web Vitals, індексація, глибина сканування) [11]. Одиницею спостереження є сторінка або кластер URL за цільовим запитом у двох вікнах «до/після» втручання. Цільову змінну задавали як бінарний «успіх» (пороговий приріст позицій/трафіку/конверсії) або як безперервну величину (Δ показників). Попередня обробка включала очищення й імпутацію пропусків, усічення викидів, стандартизацію ознак та кодування категорій, причому всі трансформації виконувалися всередині навчальних фолд для запобігання витокам інформації. Дисбаланс класів коригували вагами у функції втрат (за потреби SMOTE лише на тренувальних підмножинах) [10].

Модельна частина ґрунтується на SVM із RBF-ядром (лог-сітка для Ста γ), із порівнянням до регуляризованої логістичної регресії та деревних методів (Random Forest/XGBoost) як базових підходів. Оцінювання здійснювали за стратифікованою k-fold крос-валідацією з відкладеним тестом; для часових сценаріїв застосовували розбиття за принципом ковзного вікна. Для класифікації звітували ROC-AUC, PR-AUC, F1, balanced accuracy і Brier score з 95 % ДІ (бутстреп), для регресії MAE, RMSE та R^2 з аналізом залишків; статистичні відмінності перевіряли тестом DeLong/Віллкосона [2]. Робастність перевіряли абляціями ознак та перевітками «leave-one-domain-out». Основні джерела похибок вибіркової зсуви (домени/тематики), сезонність і зовнішні апдейти пошукових систем; їхню дію зменшували контролем часових лагів, груповими валідаціями та чутливим аналізом. Відтворюваність забезпечено фіксацією протоколу формування ознак, випадкових зерен і версій інструментів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасна наукова дискусія щодо ефективності пошукової оптимізації (SEO) розгортається навколо трьох взаємопов'язаних площин: факторів результативності (on-page, off-page, технічні сигнали), коректних підходів до вимірювання впливу (позиції, органічні сеанси,

CTR, конверсії) та використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування результатів кампаній [1]. Ранні та галузеві праці, як правило, акцентували на евристичних контенту й посилань, тоді як новіші дослідження більш системно пов'язують якість контенту, семантичну релевантність запитів, авторитет домену та технічну продуктивність із цільовими метриками видимості й трафіку. Узгоджено, що надійні результати потребують урахування сукупності сигналів, а не окремих «шорткатів» (наприклад, лише кількість беклінків без їхньої якості чи контексту) [11].

Окремий кластер робіт зосереджено на технічних факторах швидкодії, доступності для обходу й індексації, Core Web Vitals, коректності канонікалів, hreflang і структурованих даних як необхідних, але недостатніх умов для сталого органічного зростання. Ці праці показують, що технічні бар'єри здатні «обрізати» ефект навіть добре реалізованих контентних і посилальних стратегій, що вимагає інтегрованого, а не послідовного підходу до втручань. У площині off-page-напряму зберігається консенсус щодо пріоритету якості посилальних джерел, тематичної відповідності та різноманіття анкорів порівняно з «сирою» кількістю посилань [2].

Разом із тим, методологічні виклики залишаються значними. Багато емпіричних досліджень обмежуються локальними вибірками, застосовують непрозорі правила формування датасетів, не контролюють сезонність і зовнішні апдейти пошукових систем, що знижує зовнішню валідність висновків [3]. Часто фіксуються порушення принципів валідації (data leakage під час масштабування/відбору ознак на повному наборі, змішування періодів «до/після»), що призводить до завищених оцінок якості моделей. Паралельно відзначається дефіцит робіт зі стандартизованим звітуванням інтервенцій (опис точного набору дій, їхніх дат і лагів оцінки) та з відкритими репозиторіями ефект-сайзів, придатними для метааналізу.

У застосуванні машинного навчання до SEO-даних переважають табличні методи (регуляризована логістична регресія, дерева рішень, ансамблі) та SVM для класифікаційних і регресійних постановок завдання. Порівняльні дослідження демонструють, що SVM із RBF-ядром є конкурентним за умов невеликої/середньої розмірності, нелінійності рішучої межі та дисбалансу класів; водночас деревні ансамблі часто краще працюють на різноманітних, «шумних» наборах ознак, але поступаються за стабільністю й калібруванням імовірностей. Окремі праці впроваджують інструменти інтерпретації (permutation importance, SHAP) для виведення керуваних рекомендацій, однак у більшості публікацій відсутні протоколи робастності (time-split, leave-one-domain-out) і статистичні тести відмінностей між моделями [4].

Критичний огляд показує також методологічну прогалину між кореляційними підходами та каузальними оцінками ефектів SEO-втручань. Лише обмежена кількість досліджень намагається застосовувати дизайн прихованих експериментів (staggered rollouts, synthetic control, difference-in-differences), що дозволило б відокремити ефекти інтервенцій від фонових трендів і сезонності [2]. Відсутність загальноприйнятих стандартів опису втручань і метрик ускладнює відтворюваність і метааналітичну синтезу, а також переносимість результатів між нішами й мовними ринками.

Таким чином, актуальність обраної теми підтверджується: (i) браком відтворюваних, статистично коректних протоколів оцінювання SEO-ефективності; (ii) недостатньою інтеграцією контентних, посилальних і технічних сигналів у єдиному прогнозному пайплайні; (iii) дефіцитом прозорих інструментів підтримки рішень, які надають кількісні прогнози з інтервалами невизначеності та виводять пріоритети дій. Запропонована в цій роботі постановка побудова та валідація SVM-моделі з чітким протоколом формування даних, запобіганням витокам, багатокритеріальним оцінюванням і робастними перевірками безпосередньо адресує зазначені прогалини, створюючи підґрунтя для стандартизованого звітування й подальших каузальних досліджень.

Виклад основного матеріалу. Опис вибірки та первинні спостереження. Досліджено корпус сторінок/кластерів запитів, згрупованих у два часові вікна «до/після» втручань. Розподіли ключових ознак виявили очікувану скошеність для посилальних показників (довгі «хости» правого хвоста) та помірну кореляцію між контентними метриками (узгодженість ключових слів, повнота метаданих) і змінами видимості. Після очищення та усічення на крайніх перцентиліях збережено репрезентативний масив спостережень; узагальнені статистики наведено у табл. 1. Аналіз парних кореляцій підтвердив, що жодна група ознак (on-page, off-page, технічні) не є самодостатньою предикторною підсистемою: найвищі асоціації з цільовими метриками спостерігаються для комбінацій контентних і технічних сигналів, підсилених якісними посиланнями.

Якість моделей і порівняння з бейзлайнами. Основна модель SVM із RBF-ядром продемонструвала стабільно вищі показники, ніж регуляризована логістична регресія, та зіставну/вищу якість відносно деревних ансамблів у сценаріях із помірною розмірністю ознак і дисбалансом класів. За підсумками стратифікованої k-fold крос-валідації та відкладеного тесту було отримано конкурентні значення ROC-AUC і PR-AUC із вузькими довірчими інтервалами (95 % ДІ бутстрепом); калібрувальні криві вказують на кращу відповідність прогнозних імовірностей у SVM після ізотонного калібрування, ніж у деревних методів. Статистичні відмінності в AUC між моделями перевірено тестом DeLong; підсумки наведено у табл. 2, графічні результати на рис. 1 (ROC/PR-криві). У регресійній постановці (за наявності) SVM-регресор із RBF досяг нижчих MAE/RMSE порівняно з лінійними підходами, що узгоджується з наявністю нелінійних зв'язків між ознаками та результатом.

Таблиця 1

Узагальнені статистики ознак (після очищення та усічення крайніх перцентилів)

Ознака	N	Середнє	Std	Медіана	P10	P90
Оцінка якості контенту (0–100)	4821	71.4	12.2	72.0	53.0	86.0
Семантична схожість «запит-контент» (0–1)	4821	0.63	0.12	0.64	0.45	0.78
Повнота метаданих (%)	4821	82.1	14.6	85.0	60.0	98.0
Наявність структурованих даних (0/1)	4821	0.56	0.50	1.00	0.00	1.00
Авторитет домену (0–100)	4821	38.7	15.9	36.0	20.0	60.0
К-ть реф. доменів (log)	4821	2.41	0.61	2.40	1.40	3.40
Різноманіття анкорів (1–HHI)	4821	0.72	0.11	0.73	0.55	0.86
LCP (с)	4821	3.1	0.9	2.9	2.0	4.5
INP (мс)	4821	280	95	260	160	430
Глибина обходу (рівні)	4821	2.7	1.1	3.0	1.0	4.0
Частка проіндексованих URL (%)	4821	88.5	9.2	92.0	70.0	98.0
Базовий ранг (менше – краще)	4821	18.9	9.6	17.0	7.0	32.0

Таблиця 2

Якість моделей і порівняння з бейзлайнами

Модель	ROC-AUC (CV, середнє ±95 % ДІ)	PR-AUC (CV, середнє ±95 % ДІ)	F1 (CV)	Balanced accuracy (CV)	Brier score (CV)	ROC-AUC Hold-out	PR-AUC Hold-out	p-значення DeLong vs SVM
Логістична регресія (L2)	0.812 ± 0.014	0.648 ± 0.018	0.63	0.74	0.201	0.808	0.643	<0.001
Random Forest	0.842 ± 0.012	0.694 ± 0.017	0.67	0.77	0.188	0.846	0.701	0.031
SVM (RBF)	0.862 ± 0.010	0.728 ± 0.016	0.70	0.80	0.176	0.867	0.733	–

Внесок ознак і модератори ефекту. Перестановочна важливість (permutation importance) та локальні пояснення (SHAP) виявили консистентний набір провідних предикторів: якість і повнота контенту, семантична узгодженість ключових слів, авторитет і тематична відповідність донорів посилань, а також технічні метрики продуктивності (насамперед LCP/INP) та індексації. Встановлено модерацію ефекту: сильний посилювальний сигнал без технічної придатності (повільне завантаження, проблеми рендерингу/індексації) дає обмежений приріст; натомість поєднання on-page оптимізації з авторитетними беклінками і дотриманням Core Web Vitals істотно підвищує імовірність досяжних поліпшень видимості, CTR і конверсій (табл. 3). Додатково з'ясовано, що структуровані дані та внутрішня перелінювання діють як підсилювачі за інших рівних умов.

Абляції та чутливісний аналіз. Серія абляцій підтвердила вклад кожної групи ознак. Виключення технічних метрик призводить до найбільшого падіння PR-AUC у доменах із початковими проблемами продуктивності; видалення посилювальних ознак до деградації на кластерах із висококонкурентними запитами; обмеження лише контентними ознаками залишає прийнятні результати для інформаційних запитів, але гірші для транзакційних. Чутливісні тести до порогів визначення «успіху» (класифікація) показали стабільність переваги SVM у діапазоні практично вживаних порогів. Перевірка «leave-one-domain-out» засвідчила задовільну переносимість, хоча в нішах із нетиповими SERP-фічами (агрегатори, маркетплейси) точність знижується – це відображено в обмеженнях.

Робастність і загрози валідності. Контроль можливих витоків інформації забезпечено фітінгом усіх трансформацій (імпутація, масштабування, відбір ознак) виключно на тренувальних підмножинах у межах кожної фолди та дотриманням часових лагів між інтервенцією і вимірюванням ефекту. Сезонність та апдейти пошукових систем частково нівельовано темпоральними фіксаторами й розбиттями за часом; залишковий ризик обговорено нижче. Результати зберігають якість за альтернативних сіток гіперпараметрів і різних співвідношень класів.

Обговорення результатів. Отримані висновки узгоджуються з міжнародною літературою про необхідність інтегрованого підходу: контент × посилання × технічна придатність. На практиці це означає, що пріоритизація дій має базуватися не на окремих «сильних» сигналах, а на мінімально достатньому наборі з трьох блоків, причому технічні бар'єри слід усувати на ранніх етапах, аби не «обмежувати стелю» приростів. Перевага SVM із RBF-ядром над лінійними підходами підтверджує наявність нелінійностей і взаємодій між ознаками; водночас ансамблеві дерева можуть бути корисними як додаткові бенчмарки у «шумних» даних. Практична значущість полягає у можливості планувати SEO-програми як портфель дій: модель надає ймовірнісні прогнози, інтервали невизначеності та пояснення на рівні ознак, що полегшує комунікацію зі стейкхолдерами і вибір дій з найвищим очікуваним ефектом.

Внесок ознак і модератори ефекту (перестановочна важливість і SHAP)

№	Ознака	Перестановочна важливість, %	Середнє SHAP	Напрямок (+/-)	Примітка-модератор	Поріг із PDP (орієнтовно)
1	Content quality score	14.8	0.118	+	Stronger when LCP <2.5 s	75+
2	Keyword-content semantic similarity	13.6	0.111	+	Amplified with high anchor diversity	0.7+
3	Domain authority	11.9	0.097	+	Diminished if indexation <80 %	45+
4	Referring domains (log)	10.7	0.091	+	Stronger for competitive queries	≥3.0
5	Largest Contentful Paint (LCP)	9.8	0.083	-	Bottleneck regardless of backlinks	<2.5 s
6	Indexed ratio	8.6	0.074	+	Acts as gate for link benefits	≥90 %
7	Anchor diversity (1-HHI)	7.5	0.066	+	Reduces over-optimization risk	≥0.7
8	Interaction to Next Paint (INP)	7.2	0.064	-	High INP penalizes CTR gains	<250 ms
9	Structured data present	6.0	0.053	+	Boost larger for informational queries	1
10	Internal link depth	5.1	0.045	∩	Too deep harms crawl efficiency	≤3

Обмеження і подальші дослідження. Обмеження стосуються потенційних вибірових зсувів (галузі, мовні ринки), неповноти лейблів інтервенцій і залишкових темпоральних ефектів. Перспективними напрямками є: каузальні дизайни (staggered rollouts, synthetic control, DiD), стандартизоване звітування про втручання (опис дій, дати, лаги) та публічні репозиторії ефект-сайзів для метааналітичної перевірки узагальнюваності результатів.

Висновки. У дослідженні досягнуто поставленої мети: запропоновано та валідаційно перевірено відтворюваний фреймворк прогнозування ефективності SEO-втручання на основі SVM із чітким протоколом формування даних, попередньої обробки та крос-валідаційного оцінювання. Результати підтверджують доцільність такої методології для практичних задач планування SEO.

Показано, що найвищу прогнозу спроможність забезпечує інтегроване використання контентних, посилальних і технічних сигналів. Жоден із блоків ознак окремо не є достатнім для стабільних приростів видимості, CTR і конверсій.

Отримані результати засвідчили перевагу SVM із RBF-ядром над лінійними бейзлайнами та зіставну або вищу якість відносно деревних ансамблів, що вказує на нелінійний характер взаємодій ознак. Аналіз важливості та модерації ефектів підтвердив «шлюзову» роль технічної придатності (Core Web Vitals, індексація) для реалізації потенціалу контенту й зворотних посилення.

Серія абляцій і чутливісних перевірок (варіація порогів «успіху», альтернативні сітки гіперпараметрів, leave-one-domain-out) засвідчила робастність висновків і відсутність домінування одиничних доменів або кластерів запитів. Водночас ідентифіковано обмеження, пов'язані з можливими вибіровими зсувами, неповнотою маркування інтервенцій і залишковими темпоральними ефектами.

Запропонований робочий процес підтримки рішень формує ймовірнісні прогнози з довірчими інтервалами та пояснення на рівні ознак, що дає змогу пріоритизувати дії з найбільшим очікуваним ефектом до старту кампаній. Перспективи подальших робіт охоплюють каузальні дизайни (staggered rollouts, synthetic control, difference-in-differences), стандартизацію звітування про SEO-втручання та створення відкритих репозиторіїв ефект-сайзів для підвищення відтворюваності й зовнішньої валідності результатів.

Список використаних джерел:

1. Saura J. R. Using Data Sciences in Digital Marketing: Framework, methods, and performance metrics. *Journal of Innovation & Knowledge*, 2021. 6(2), 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2020.08.001>
2. Salminen J., Marttila R., Corporan J., Salenius T., Jansen B. J. Using Machine Learning to Predict Ranking of Webpages in the Gift Industry: Factors for Search-Engine Optimization. *Proceedings of the 9th International Conference on Information Systems and Technologies (ICIST 2019)*, 2019. 1–8. <https://doi.org/10.1145/3361570.3361578>
3. Matošević G., Dobša J., Mladenčić D. Using Machine Learning for Web Page Classification in Search Engine Optimization. *Future Internet*, 2021. 13(1), 9. <https://doi.org/10.3390/fi13010009>
4. Roumeliotis K. I., Tselikas N. D. A Machine Learning Python-Based Search Engine Optimization Audit Software. *Informatics*, 2023. 10(3), 68. <https://doi.org/10.3390/informatics10030068>

-
5. Macumber R., Eswar Pagadala V. D. Google, SEO and helpful content: How artificial intelligence can be helpful for e-commerce websites. *Journal of Digital & Social Media Marketing*, 2024. 12(3), 206–226. <https://doi.org/10.69554/RJUW9313>
 6. Saeed Z., Aslam F., Ghafoor A., Umair M., Razzak I. Exploring the impact of SEO-based ranking factors for voice queries through machine learning. *Artificial Intelligence Review*, 2024. 57, 144. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10780-9>
 7. Alotaibi S., Alotaibi B. A review of click-through rate prediction using deep learning. *Electronics*, 2025. 14(18), 3734. <https://doi.org/10.3390/electronics14183734>
 8. Santiago, M., Febiansyah, H., & Dinarwati, D. (2024). Integrating Machine Learning with Web Intelligence for Predictive Search and Recommendations. *International Transactions on Artificial Intelligence*, 3(1), 44–53. <https://doi.org/10.33050/italic.v3i1.654>
 9. Vinutha M. S., Padma, M. C. Insights into Search Engine Optimization using Natural Language Processing and Machine Learning. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2023. 14(2). URL: https://thesai.org/Downloads/Volume14No2/Paper_11-Insights_into_Search_Engine_Optimization.pdf
 10. “Feature Selection using Machine Learning Techniques Based on a Case Study” (2020). *ACM Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3432291.3432308>
 11. Aman, S. S. (2024). Search engine Performance optimization: methods and techniques. *PMC Open Access*. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11157186/>

References:

1. Saura, J. R. (2021). Using Data Sciences in Digital Marketing: Framework, methods, and performance metrics. *Journal of Innovation & Knowledge*, 6(2), 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2020.08.001>
2. Salminen, J., Marttila, R., Corporan, J., Salenius, T., & Jansen, B. J. (2019). Using Machine Learning to Predict Ranking of Webpages in the Gift Industry: Factors for Search-Engine Optimization. *Proceedings of the 9th International Conference on Information Systems and Technologies (ICIST 2019)*, 1–8. <https://doi.org/10.1145/3361570.3361578>
3. Matošević, G., Dobša, J., & Mladenčić, D. (2021). Using Machine Learning for Web Page Classification in Search Engine Optimization. *Future Internet*, 13(1), 9. <https://doi.org/10.3390/fi13010009>
4. Roumeliotis, K. I., & Tselikas, N. D. (2023). A Machine Learning Python-Based Search Engine Optimization Audit Software. *Informatics*, 10(3), 68. <https://doi.org/10.3390/informatics10030068>
5. Macumber, R., & Eswar Pagadala, V. D. (2024). Google, SEO and helpful content: How artificial intelligence can be helpful for e-commerce websites. *Journal of Digital & Social Media Marketing*, 12(3), 206–226. <https://doi.org/10.69554/RJUW9313>
6. Saeed, Z., Aslam, F., Ghafoor, A., Umair, M., & Razzak, I. (2024). Exploring the impact of SEO-based ranking factors for voice queries through machine learning. *Artificial Intelligence Review*, 57, 144. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10780-9>
7. Alotaibi, S., & Alotaibi, B. (2025). A review of click-through rate prediction using deep learning. *Electronics*, 14(18), 3734. <https://doi.org/10.3390/electronics14183734>
8. Santiago, M., Febiansyah, H., & Dinarwati, D. (2024). Integrating Machine Learning with Web Intelligence for Predictive Search and Recommendations. *International Transactions on Artificial Intelligence*, 3(1), 44–53. <https://doi.org/10.33050/italic.v3i1.654>
9. M. S., Vinutha, & Padma, M. C. (2023). Insights into Search Engine Optimization using Natural Language Processing and Machine Learning. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 14(2). Retrieved from: https://thesai.org/Downloads/Volume14No2/Paper_11-Insights_into_Search_Engine_Optimization.pdf
10. “Feature Selection using Machine Learning Techniques Based on a Case Study” (2020). *ACM Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3432291.3432308>
11. Aman, S. S. (2024). Search engine Performance optimization: methods and techniques. *PMC Open Access*. Retrieved from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11157186/>

Дата першого надходження статті до видання: 21.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

Отрох С. І., доктор технічних наук, професор,
професор кафедри цифрових технологій в енергетиці
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-9008-0902

Кублій Л. І., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри цифрових технологій в енергетиці
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-1015-3209

Защинська М. О., здобувач вищої освіти
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0007-9853-3348

МОНІТОРИНГ СТАНУ РОЗУМНОГО БУДИНКУ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ІОТ

У статті детально проаналізовано процес розроблення моделі системи моніторингу розумного будинку на основі технологій Інтернету речей (IoT) та розкрито ключові аспекти побудови сучасних інтелектуальних систем автоматизації житла. Розглянуто концептуальні засади функціонування розумного будинку, що передбачають тісну взаємодію сенсорних елементів, мікроконтролерів, шлюзів та виконавчих пристроїв у реальному часі. Саме поєднання цих компонентів забезпечує можливість безперервного збору, аналізу та обробки даних, необхідних для контролю параметрів середовища, підвищення рівня безпеки, комфорту та енергоефективності житлових приміщень.

У роботі проведено ґрунтовне дослідження архітектури IoT-системи та описано принципи її реалізації у віртуальному середовищі Cisco Packet Tracer, яке слугує інструментом для моделювання взаємодії IoT-пристроїв без потреби у фізичному обладнанні. Особливу увагу приділено алгоритмам автоматичного реагування на події. Такий підхід демонструє важливість інтеграції інтелектуальних механізмів керування, які формують основу концепції «розумного» житлового середовища.

Окремо розглянуто технічні та функціональні можливості розробленої моделі. Наведено характеристику використаних типів сенсорів, способів організації передачі даних, особливостей взаємодії компонентів у межах локальної мережі, а також засобів забезпечення стабільності та коректності роботи системи. Здійснено тестування моделі, результати якого підтвердили її надійність, узгодженість роботи окремих IoT-компонентів і здатність системи виконувати основні функції моніторингу безпеки в автоматичному режимі. Отримані результати свідчать про доцільність використання створеної моделі як навчального інструменту для здобуття практичних навичок у галузі технологій IoT, а також як демонстраційного прикладу для дослідження принципів побудови інтегрованих систем розумного дому.

Стаття демонструє підхід до створення IoT-рішень, орієнтованих на забезпечення безпеки та комфорту користувача. Розроблена модель може слугувати основою для подальших експериментів і досліджень у сфері автоматизації житлових приміщень та є актуальним прикладом застосування технологій Інтернету речей у сучасних умовах розвитку цифрової інфраструктури.

Ключові слова: розумний будинок, Інтернет речей, мікроконтролер, Cisco Packet Tracer, сенсори, автоматизація, безпека.

Otrokh S. I., Kublii L. I., Zashchytynska M. O. Monitoring the status of a smart home using IoT technology

The article provides a detailed analysis of the process of developing a smart home monitoring system model based on Internet of Things (IoT) technologies and reveals the key aspects of building modern intelligent home automation systems. It examines the conceptual principles of smart home operation, which involve close interaction between sensors, microcontrollers, gateways, and actuators in real time. It is the combination of these components that enables the continuous collection, analysis and processing of data necessary to control environmental parameters and improve the safety, comfort and energy efficiency of residential premises.

The paper conducts a thorough study of the architecture of the IoT system and describes the principles of its implementation in the Cisco Packet Tracer virtual environment, which serves as a tool for modelling the interaction of IoT devices without the need for physical equipment. Particular attention is paid to algorithms for automatic response to events. This approach demonstrates the importance of integrating intelligent control mechanisms that form the basis of the concept of a 'smart' living environment.



The technical and functional capabilities of the developed model are considered separately. The characteristics of the types of sensors used, methods of data transmission, features of component interaction within a local network, as well as means of ensuring the stability and correct operation of the system are presented. The model was tested, and the results confirmed its reliability, the coordination of individual IoT components, and the system's ability to perform basic security monitoring functions in automatic mode. The results obtained indicate the feasibility of using the created model as a training tool for acquiring practical skills in the field of IoT technologies, as well as a demonstration example for studying the principles of building integrated smart home systems.

The article demonstrates an approach to creating IoT solutions focused on ensuring user safety and comfort. The developed model can serve as a basis for further experiments and research in the field of residential automation and is a relevant example of the application of Internet of Things technologies in the current conditions of digital infrastructure development.

Key words: smart home, Internet of Things, microcontroller, Cisco Packet Tracer, sensors, automation, security.

Постановка проблеми. Розвиток цифрових технологій сприяє активному впровадженню концепції розумного будинку, що передбачає автоматизацію управління житловими процесами з метою підвищення безпеки, комфорту та енергоефективності. Одним із ключових напрямів такого розвитку є моніторинг стану середовища з використанням технології Інтернету речей (IoT), яка забезпечує взаємодію пристроїв у режимі реального часу та відкриває нові можливості для побудови інтегрованих, адаптивних систем керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях, присвячених моделюванню систем «розумного будинку» засобами технологій IoT, значну увагу приділено використанню симуляторів, зокрема Cisco Packet Tracer. У роботі [1] показано, що даний симулятор дозволяє ефективно відтворювати структуру та логіку взаємодії сенсорів і мережевих пристроїв, забезпечуючи реалістичну модель роботи IoT-системи у домашньому середовищі. Автор підкреслює можливість побудови сценаріїв автоматизації, моніторингу параметрів середовища та тестування поведінки пристроїв без потреби у фізичному обладнанні.

Інше дослідження [2], присвячене створенню «розумного і безпечного будинку» за допомогою Cisco Packet Tracer, демонструє, що симуляційні моделі є корисним інструментом для аналізу безпеки IoT-архітектур. Автори наголошують на важливості коректної конфігурації датчиків руху, диму, камер спостереження та системи сповіщення. Особливу увагу вони приділяють доступності інструментів для студентів та розробників, оскільки Cisco Packet Tracer дозволяє відтворювати складні взаємодії між пристроями з мінімальним порогом входу.

У публікації [3] розглянуто ширший підхід до створення IoT-систем розумного будинку, включаючи моделі зв'язку, принципи під'єднання сенсорних модулів і питання масштабованості. Автори зазначають, що симуляційні середовища відіграють ключову роль на етапах тестування, оскільки дають змогу дослідникам проводити експерименти з різними конфігураціями мережі, оптимізувати обмін даними та оцінювати реакцію системи на події в режимі реального часу.

Загалом проаналізовані публікації підкреслюють, що симуляція «розумного будинку» в Cisco Packet Tracer є ефективною дослідницькою методологією. Вона забезпечує можливість моделювання IoT-архітектур, відтворення логіки автоматизації, аналізу безпеки та навчання принципам побудови інтелектуальних систем без необхідності у дорогому обладнанні. Водночас у роботах зазначається, що питання інтеграції хмарних сервісів, машинного навчання та реальних протоколів IoT залишаються перспективними напрямками подальших досліджень.

Мета статті – розробка та дослідження програмної моделі системи моніторингу безпеки розумного будинку на основі технології IoT у середовищі Cisco Packet Tracer. У межах цієї мети передбачено створення функціональної архітектури системи, що об'єднує сенсори руху й диму, мікроконтролер MCU, шлюз і виконавчі пристрої, а також розробку логіки автоматичного реагування на події. Реалізація такого підходу дозволяє продемонструвати практичні можливості IoT для забезпечення безпеки житлових приміщень, виявлення потенційних загроз і підвищення ефективності взаємодії між елементами розумного середовища.

Виклад основного матеріалу. Системи розумного будинку – це багаторівневі комплекси, які поєднують апаратні (сенсори, контролери, шлюзи) та програмні компоненти (логіка, інтерфейси, мережа) для автоматизації житлового простору [4]. Архітектура таких систем часто базується на ієрархічній структурі «сенсор → контролер → актор → користувач», що забезпечує послідовну обробку даних від вимірювання до дії та взаємодії з людиною. Наприклад, у дослідженні підкреслюється, що сенсори та актори становлять базовий рівень IoT-архітектури, тоді як контролери і шлюзи виступають як проміжні вузли обробки та керування.

Сенсори відіграють важливу роль на початковому етапі: вони збирають інформацію про стан середовища, зокрема про рух, дим, температуру та вологість, і передають ці дані до контролера або шлюза. У стандартних IoT-системах сенсорний компонент служить основною «точкою входу» для автоматизації та аналітики.

Контролер (наприклад, мікроконтролер MCU або локальний шлюз) обробляє отримані сигнали, реалізує задану логіку реагування (наприклад «якщо дим > порогова значення, то активувати сирену») і підключає виконавчі пристрої – актори. Контролер часто розглядається як частина «ядра» системи розумного будинку, яке координує взаємодію між сенсорами, шлюзом і виконавчими елементами [5].

Виконавчі пристрої (актори) виконують конкретні дії: увімкнення лампи, активація сирени чи відеокамери, зміну режиму роботи кліматичної системи тощо. Цей рівень забезпечує фізичну реакцію на подію,

зафіксовану сенсором і оброблену контролером. Водночас шлюз (Home Gateway) виступає зв'язковим елементом між локальною системою автоматизації та користувачем або мережею Інтернет: він може передавати дані в хмару, надавати доступ через мобільний додаток, координувати підключення зовнішніх сервісів.

Ключовою особливістю сучасних систем розумного будинку є їхня автономність і адаптивність – здатність реагувати на події без участі користувача, оптимізуючи споживання енергії та підвищуючи безпеку [6]. Наприклад, система може автоматично знижувати температуру чи вимикати світло, коли нікого немає в кімнаті, або активувати сигналізацію при виявленні диму чи руху. Ця адаптивна логіка, яка полягає у взаємодії сенсорів-контролерів-акторів, є характерною рисою IoT-рішень для житлових середовищ.

Технологія Internet of Things (IoT)

Технологія IoT дозволяє поєднувати фізичні пристрої – сенсори, датчики, шлюзи – у єдину мережеву екосистему, яка забезпечує обмін даними між пристроями у режимі реального часу [7]. Вона створює можливість не просто підключення «речей» до Інтернету, а взаємодії між ними з метою автоматизації та моніторингу. Наприклад, сенсор руху може передавати сигнал до контролера, який через шлюз – передає інформацію у хмару чи локальний сервіс – і тоді актор (лампа чи сирена) виконує дію. Таким чином IoT-система стає розподіленою екосистемою даних, а не просто набором автономних пристроїв.

У контексті «розумного будинку» ця технологія дозволяє ефективно здійснювати безперервний обмін інформацією між сенсорами, мікроконтролерами й виконавчими пристроями. Сенсори збирають дані – наприклад, температура, рух, дим – контролер обробляє інформацію й приймає рішення, виконавчі пристрої реалізують ці рішення, а шлюз чи контролер взаємодіє із зовнішнім інтерфейсом (мобільним додатком або хмарою). Така архітектура забезпечує автоматизацію житлового процесу: наприклад, якщо сенсор диму зафіксує небезпечну ситуацію, система може миттєво активувати сирену або надсилати сповіщення на телефон.

Комунікація між пристроями у IoT-системах здійснюється за допомогою специфічних протоколів, таких як MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), CoAP (Constrained Application Protocol) або стандартного HTTP (Hypertext Transfer Protocol). Кожний із цих протоколів має свої переваги й обмеження: MQTT використовує модель «publish-subscribe» і є ефективним для сценаріїв із великою кількістю пристроїв та надійною доставкою повідомлень; CoAP оптимізований для пристроїв із обмеженими ресурсами (пам'ять, обробка, енергія), працює на UDP та підтримує REST-подібні інтерфейси; HTTP є більш загальним, але менш оптимізованим для енергообмежених IoT-пристроїв [8].

У середовищі симуляції, наприклад Cisco Packet Tracer, ці процеси моделюються програмно: створюється віртуальна мережа сенсорів, мікроконтролера і виконавчих пристроїв, налаштовуються протоколи обміну даними, імітуються події та їх обробка [4]. Це дає змогу навчальним або демонстраційним проектам працювати без реального фізичного обладнання, що зручно для освітніх цілей, швидкої перевірки архітектури системи, тестування логіки реагування та моделювання «розумного будинку». Подібні підходи дозволяють майбутнім фахівцям опанувати принципи IoT-автоматизації в безпечному віртуальному середовищі.

Архітектура розробленої системи

Архітектура створеної системи базується на принципах технології Інтернету речей (IoT), де всі пристрої об'єднані у єдину локальну мережу та взаємодіють між собою через шлюз Home Gateway. Основними компонентами системи є сенсори руху та диму, мікроконтролер MCU, виконавчі пристрої (сирена, лампа та відеокамера), шлюз Home Gateway і смартфон із додатком IoT Monitor.

Система побудована за принципом «сенсор – контролер – актор». Сенсори виступають джерелом даних, MCU виконує функцію обробки сигналів і керування, а виконавчі пристрої реалізують фізичну дію у відповідь на подію. Home Gateway забезпечує мережеву взаємодію між усіма компонентами та дозволяє керувати системою дистанційно через IoT Monitor.

У створеній моделі (рисунок 1) реалізовано два основні сценарії реагування:

- сценарій безпеки при русі: коли сенсор руху фіксує об'єкт, MCU активує сирену, лампу та відеокамеру;
- сценарій пожежної безпеки: при спрацьовуванні датчика диму система формує сигнал тривоги, який може бути переданий у монітор чи хмарний застосунок.

Така архітектура демонструє основні принципи функціонування розумного будинку: взаємозв'язок пристроїв, автоматичне реагування на зміни в середовищі та можливість централізованого контролю.

Логіка роботи системи та програмування MCU

Основна логіка роботи системи реалізована на рівні мікроконтролера MCU. Саме він виконує роль «мозку» системи, зчитуючи дані з сенсорів і подаючи команди на виконавчі пристрої.

У середовищі Cisco Packet Tracer програмування MCU здійснюється за допомогою вбудованих мов, таких як JavaScript, Python або Visual Basic. Для створення моделі в даній роботі використано JavaScript і Python, які дозволяють легко реалізувати логіку умовного керування.

Приклад коду для реалізації автоматичної реакції на спрацьовування сенсора руху наведено на рисунку 2.

У наведеному коді реалізовано логіку автоматичного керування сиреною та відеокамерою на основі сигналу від сенсора руху. Мікроконтролер зчитує стан вхідного порту (датчика руху), і якщо фіксується рух (`digitalRead(0) == HIGH`), система виводить повідомлення «Motion detected!» та активує підключені пристрої – сирену й камеру. Якщо рух не виявлено, вихідні порти вимикаються, забезпечуючи

Подальший розвиток проєкту передбачає розширення функціональності за рахунок інтеграції хмарних сервісів для зберігання даних моніторингу, мобільних сповіщень через застосунки Android/iOS, а також елементів штучного інтелекту для прогнозування подій і самонавчання системи на основі історичних даних. Перспективним напрямом є впровадження технологій машинного навчання для автоматичного визначення нетипових ситуацій (наприклад, аномальної активності сенсорів), використання нейронних мереж для оптимізації сценаріїв керування енергоспоживанням, а також розширення архітектури для інтеграції з іншими IoT-платформами.

Результати роботи доводять доцільність застосування IoT-підходів для побудови безпечних, енергоефективних і зручних систем управління житловими середовищами. Запропонована модель є базовим прикладом практичної реалізації концепції «розумного будинку» й може стати основою для подальших наукових та прикладних досліджень у сфері автоматизації, комп'ютерних мереж та кіберфізичних систем.

Список використаних джерел:

1. Ghaliya Alfarsi. Using Cisco Packet Tracer to simulate Smart Home. *International Journal of Engineering Research and*. 2020. Т. V8, № 12. <https://doi.org/10.17577/ijertv8is120211>
2. Sinaga D. C. P., Tampubolon G. J., Ndruru I. Implementation of a smart home based on internet of things using Cisco Packet Tracer. *Journal of Computer Networks, Architecture and High Performance Computing*. 2024. Т. 6, № 1. С. 407–418. <https://doi.org/10.47709/cnahpc.v6i1.3518>
3. Smart and secure home using IOT Simulations with Cisco Packet Tracer / R. R. Chaudhari та ін. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. 2020. С. 88–93. <https://doi.org/10.32628/cseit206311>
4. Smart Home: Architecture, Technologies and Systems / M. Li та ін. *Procedia Computer Science*. 2018. Т. 131. С. 393–400. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.219>
5. Lee K.-M., Teng W.-G., Hou T.-W. Point-n-Press: An Intelligent Universal Remote Control System for Home Appliances. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2016. Vol. 13, no. 3. P. 1308–1317. <https://doi.org/10.1109/tase.2016.2539381>
6. An overview of IoT architectures, technologies, and existing open-source projects / T. Domínguez-Bolaño et al. *Internet of Things*. 2022. P. 100626. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100626>
7. Puthiyidam J. J. IoT Smart Home: Protocols and Architectures. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2017. Vol. V, no. XI. P. 2031–2038. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2017.11293>
8. From MQTT to CoAP: An Introduction to IoT Communication Protocol Selection. *IOT Module Shop Manufacturer Factory*. URL: <https://ebyteiot.com/it/blogs/ebyte-iot-blog/from-mqtt-to-coap-an-introduction-to-iot-communication-protocol-selection>

References:

1. Ghaliya Alfarsi. (2020). Using Cisco Packet Tracer to simulate Smart Home. *International Journal of Engineering Research and*, V8(12). <https://doi.org/10.17577/ijertv8is120211>
2. Sinaga, D. C. P., Tampubolon, G. J., & Ndruru, I. (2024). Implementation of a smart home based on internet of things using Cisco Packet Tracer. *Journal of Computer Networks, Architecture and High Performance Computing*, 6(1), 407–418. <https://doi.org/10.47709/cnahpc.v6i1.3518>
3. Chaudhari, R. R., Joshi, K. K., Joshi, N., & Kumar, M. (2020). Smart and secure home using IOT Simulations with Cisco Packet Tracer. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 88–93. <https://doi.org/10.32628/cseit206311>
4. Li, M., Gu, W., Chen, W., He, Y., Wu, Y., & Zhang, Y. (2018). Smart Home: Architecture, Technologies and Systems. *Procedia Computer Science*, 131, 393–400. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.219>
5. Lee, K.-M., Teng, W.-G., & Hou, T.-W. (2016). Point-n-Press: An Intelligent Universal Remote Control System for Home Appliances. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(3), 1308–1317. <https://doi.org/10.1109/tase.2016.2539381>
6. Domínguez-Bolaño, T., Campos, O., Barral, V., Escudero, C. J., & García-Naya, J. A. (2022). An overview of IoT architectures, technologies, and existing open-source projects. *Internet of Things*, 100626. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100626>
7. Puthiyidam, J. J. (2017). IoT Smart Home: Protocols and Architectures. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, V(XI), 2031–2038. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2017.11293>
8. *From MQTT to CoAP: An Introduction to IoT Communication Protocol Selection*. (2025). IOT Module Shop Manufacturer Factory. Retrieved from: <https://ebyteiot.com/it/blogs/ebyte-iot-blog/from-mqtt-to-coap-an-introduction-to-iot-communication-protocol-selection>

Дата першого надходження статті до видання: 24.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Опубліковано: 00.00.2025

Поперешняк С. В., кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інформатики та програмної інженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-0531-9809

КЛАСИФІКАЦІЙНО-СТРУКТУРНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ ВИПАДКОВОСТІ КОРОТКИХ БІНАРНИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ У СИСТЕМАХ КРИПТОГРАФІЧНОГО ЗАХИСТУ ТА ІОТ-ТЕЛЕМЕТРІЇ

У статті розглянуто проблему оцінювання випадковості коротких бінарних послідовностей, що використовуються в системах криптографічного захисту та IoT-телеметрії як ключі, токени автентифікації, службові маркери та ідентифікатори. Показано, що традиційні статистичні пакети тестування випадковості (NIST STS, DIEHARD, TestU01) орієнтовані на довгі вибірки й втрачають достовірність за довжин 8–128 біт, що є типовими для lightweight-протоколів ZigBee, LoRaWAN, RFID та вбудованих контролерів. Запропоновано класифікаційно-структурний підхід до оцінювання випадковості, який ґрунтується на аналізі неперекривних k -ланцюжків, побудові вектора емпіричних частот та використанні статистики максимального відхилення від теоретичного розподілу. Отримано теоретичну оцінку ймовірності великих відхилень на основі нерівності Гьофдінга, що дозволяє задати порогове значення критерію для заданого рівня значущості й формально контролювати ймовірність помилки прийняття рішень. Запропонований підхід формалізує задачу оцінювання випадковості як класифікаційну, що дозволяє порівнювати генератори та відсіювати не випадкові послідовності за показниками якості. Експериментальний стенд охоплює чотири класи джерел послідовностей (алгоритмічні PRNG, криптографічний AES-CTR, апаратні сенсори шуму), для яких сформовано фрагменти довжиною 8–128 біт і проведено порівняння з ENT та базовими тестами NIST SP 800-22 за метриками точності, помилки II роду, ROC-характеристиками та швидкодії. Показано, що запропонований метод забезпечує вищу точність класифікації, кращі ROC-показники та меншу варіативність результатів для коротких фрагментів, зберігаючи при цьому прийнятну обчислювальну складність для реалізації на мікроконтролерах. Окреслено практичні сценарії застосування моделі в IoT-сенсорах, системах «розумного дому», embedded-контролерах та телеметричних IDS/IPS, де запропонований критерій може виконувати роль легковагового модуля контролю якості випадковості та підвищувати загальну стійкість криптографічних протоколів до експлуатації структурних дефектів генераторів.

Ключові слова: короткі бінарні послідовності, оцінювання випадковості, IoT-телеметрія, lightweight-криптографія, класифікаційний аналіз, k -ланцюжки, критерій випадковості, псевдовипадкові генератори.

Popereshnyak S. V. A Classification–Structural Approach to Randomness Evaluation of Short Binary Sequences in Cryptographic Protection Systems and IoT Telemetry

The article addresses the problem of evaluating the randomness of short binary sequences used in cryptographic protection systems and IoT telemetry as keys, authentication tokens, service markers, and identifiers. It is shown that traditional statistical randomness test suites (NIST STS, DIEHARD, TestU01) are designed for long samples and lose reliability when applied to sequences of 8–128 bits, which are typical for lightweight protocols such as ZigBee, LoRaWAN, RFID, and embedded controllers. To overcome these limitations, a classification-driven structural approach to randomness assessment is proposed, which relies on the analysis of non-overlapping k -bit blocks, the construction of empirical frequency vectors, and the use of a maximum deviation statistic from the theoretical distribution. A theoretical estimate of the probability of large deviations is derived using Hoeffding's inequality, allowing one to specify a threshold value of the criterion for a predefined significance level and formally control the error probability in decision-making. The proposed approach formalizes the problem of randomness evaluation as a classification task, which makes it possible to compare generators and filter out non-random sequences based on quality metrics.

The experimental framework includes four classes of sequence sources (algorithmic PRNGs, the cryptographic AES-CTR generator, and hardware noise sensors). For each source, short fragments of 8–128 bits were generated and evaluated in comparison with ENT and basic NIST SP 800-22 tests using metrics such as classification accuracy, Type II error, ROC characteristics, and computational performance. The results demonstrate that the proposed method provides higher classification accuracy, superior ROC indicators, and lower variability of results on short fragments, while maintaining acceptable computational complexity for deployment on microcontrollers. Practical application scenarios are outlined for IoT sensors, smart home systems, embedded controllers, and telemetry-based IDS/IPS solutions, where the proposed criterion can serve as a lightweight randomness quality module and enhance the overall resilience of cryptographic protocols against the exploitation of structural defects in generators.

Key words: short binary sequences, randomness evaluation, IoT telemetry, lightweight cryptography, classification analysis, k -block chains, randomness criterion, pseudorandom generators.



Постановка проблеми. Сучасні інформаційні технології дедалі більше спираються на механізми формування та використання коротких бінарних послідовностей, які виступають основою ідентифікаційних та захисних процедур у розподілених системах. Зростання кількості мікросенсорних пристроїв, бездротових мереж та вбудованих контролерів обумовлює активне застосування псевдовипадкових послідовностей обмеженої довжини у криптографічних токенах, телеметричних запитах, протоколах автентифікації та обміні службовою інформацією. Зокрема, у системах типу IoT та у lightweight-протоколах (ZigBee, LoRaWAN, RFID), де обробка даних здійснюється за умов обмежених обчислювальних і енергетичних ресурсів, ефективність та надійність функціонування значною мірою визначається якістю коротких випадкових фрагментів, що формують ключі, ідентифікатори та службові маркери.

Попри широке використання коротких послідовностей, питання коректного оцінювання їхньої випадковості залишається невирішеним. Традиційно застосовувані статистичні пакети тестування (NIST STS, DIEHARD, TestU01 тощо) орієнтовані на аналіз довгих бітових вибірок і базуються на вибіркових властивостях, які ушкоджуються при застосуванні до коротких відрізків (8–128 біт). Використання таких методів у мікропристроях призводить до значної похибки оцінювання, що, своєю чергою, може спричинити появу вразливих до атак токенів, недостатньо захищені канали зв'язку та нестійкі криптографічні протоколи.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення методів оцінювання випадковості, орієнтованих саме на короткі бінарні послідовності, які враховують локальні структурні властивості, частотні параметри, перехідні закономірності та асиметрію розподілів, притаманних реальним телеметричним і криптографічним даним. Наукова гіпотеза полягає в тому, що класифікація коротких послідовностей на основі виявлення структурних та статистичних характеристик дозволяє отримати більш достовірну оцінку випадковості, ніж застосування традиційних вибіркових тестів, що орієнтовані на великі дані.

Метою дослідження є формування науково обґрунтованого підходу до оцінювання випадковості коротких бінарних послідовностей у системах криптографічного захисту та IoT-телеметрії, який враховує їхні локальні статистичні та структурні властивості.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати обмеження та помилки наявних тестів випадковості при застосуванні до коротких послідовностей;
- сформувати набір структурних та статистичних показників, що є інформативними для коротких фрагментів;
- розробити модель класифікаційного оцінювання випадковості;
- провести експериментальне дослідження на реальних криптографічних і телеметричних даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оцінювання випадковості бінарних послідовностей є ключовим елементом забезпечення безпеки криптографічних протоколів, механізмів генерації токенів автентифікації та засобів телеметрії в системах з обмеженими ресурсами (IoT-пристрої, вбудовані контролери, бездротові сенсори) [1, 2]. У більшості класичних робіт випадковість оцінюється за допомогою статистичних тестових наборів, орієнтованих на великі обсяги даних. Найбільш відомим підходом є тестовий пакет NIST SP 800-22, який включає сукупність частотних, кореляційних, спектральних та інших критеріїв для довгих бітових послідовностей і широко застосовується для валідації генераторів випадкових та псевдовипадкових чисел [1, 6]. Однак сучасні дослідження підкреслюють, що за умови малої довжини послідовностей (десятки–сотні бітів) асимптотичні припущення порушуються, що призводить до втрати чутливості та зростання похибок прийняття рішень щодо випадковості [3, 6, 7].

У роботах, орієнтованих на IoT та lightweight-криптографію, показано, що послідовності, які формуються у сенсорах та мікроконтролерах, часто мають обмежену довжину й підпорядковуються специфічним фізичним або алгоритмічним закономірностям [2, 3]. Зокрема, дослідження генераторів для IoT-пристроїв демонструють, що класичні пакети тестів, попри свою поширеність, не завжди дозволяють коректно оцінити якість коротких фрагментів, які використовуються як ключі, токени чи службові маркери в протоколах захисту [2, 3, 5].

Паралельно активно розвивається напрям структурного аналізу бінарних послідовностей, орієнтований на локальні аномалії – дисбаланс між нулями та одиницями, нетипові конфігурації серій, непропорційність переходів між бітами, циклічні повтори та стійкі фрагментні патерни [4, 7]. У роботах з хаотичних TRNG та спеціалізованих статистичних тестів для криптографічних примітивів підкреслюється, що саме аналіз мікроструктури дає змогу виявляти слабкі місця генераторів, які залишаються непоміченими при використанні лише глобальних статистичних характеристик [4, 7].

Сучасні порівняльні дослідження статистичних пакетів (NIST, Diehard, TestU01 тощо) показують, що їхні результати для коротких послідовностей можуть суттєво відрізнятись, а чутливість до специфічних типів невивадковості є неоднорідною [6, 7]. Це стимулює появу lightweight-наборів тестів і спеціалізованих критеріїв, оптимізованих під обмежені обсяги даних та підвищені вимоги до продуктивності [7].

На цьому фоні дедалі більшої уваги набувають інтелектуальні підходи до оцінювання випадковості, у яких послідовність розглядається як об'єкт класифікації (випадкова/невипадкова, з уточненням джерела генерації), а набір інформативних ознак формується на основі локальних структурних та

ентропійних характеристик [2], [8–10]. У низці робіт пропонуються глибокі неймережеві моделі та гібридні RNN-CNN-архітектури, здатні відокремлювати виходи різних PRNG, детектувати приховані закономірності в коротких послідовностях та покращувати виявлення криптографічних слабкостей [8, 9, 11]. Додатково, аналіз застосувань генераторів у IoT-сценаріях показує, що машинне навчання може бути інтегроване у цикли валідації та моніторингу якості випадковості, зокрема для lightweight-протоколів та ресурсно обмежених пристроїв [2, 3, 12].

Таким чином, у сучасній літературі простежується перехід від суто асимптотичних статистичних тестів до структурно-класифікаційних та ML-орієнтованих методів, які краще узгоджуються з вимогами коротких послідовностей у криптографічних і IoT-системах. Класифікаційні моделі, що поєднують локальні ознаки з можливістю навчання на реальних даних, розглядаються як перспективний інструмент підвищення достовірності оцінювання випадковості в умовах обмеженого обсягу даних та обчислювальних ресурсів [2, 6], [10–13].

Виклад основного матеріалу дослідження

Математична модель оцінювання випадковості коротких бінарних послідовностей. Розглянемо бінарну послідовність

$$S = (s_1, s_2, \dots, s_n), \quad s_i \in \{0, 1\},$$

де n є відносно малим (десятки–сотні бітів), що унеможливує застосування класичних асимптотичних критеріїв випадковості.

Базова нульова гіпотеза має вигляд

$$H_0: s_1, s_2, \dots, s_n \text{ – незалежні та рівномірні.}$$

У такому випадку будь-яка фіксована комбінація з k бітів (k -ланцюжок) повинна з'являтися з імовірністю

$$p_j = 2^{-k}, \quad j = 1, \dots, 2^k.$$

Однак при коротких послідовностях оцінювати частоти всіх можливих k -ланцюжків на всіх перекривних позиціях складно як аналітично (через залежності), так і статистично (мала вибірка). Тому вводимо модель, що спирається на неперекривні блоки.

Формалізація на основі неперекривних блоків. Обираємо довжину блоку k (зазвичай $k = 2$ або $k = 3$), і ділимо послідовність на

$$m = \frac{n}{k};$$

неперекривних блоків:

$$B_r = (s_{(r-1)k+1}, \dots, s_{rk}), \quad r = 1, \dots, m.$$

Кожен блок B_r належить множині всіх можливих k -ланцюжків

$$C_k = \{c^{(1)}, c^{(2)}, \dots, c^{(2^k)}\}, \quad c^{(j)} \in \{0, 1\}^k.$$

Для кожного можливого k -ланцюжка $c^{(j)}$ визначаємо випадкові змінні

$$Y_r^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } B_r = c^{(j)} \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases} \quad r = 1, \dots, m.$$

Тоді кількість появ j -го k -ланцюжка дорівнює

$$N_j = \sum_{r=1}^m Y_r^{(j)},$$

а його відносна частота

$$F_j = \frac{N_j}{m}, \quad j = 1, \dots, 2^k.$$

За гіпотези H_0 блоки B_r є незалежними, а кожна фіксована комбінація довжини k з'являється з імовірністю

$$\mathbb{P}\{B_r = c^{(j)}\} = 2^{-k},$$

тобто

$$\mathbb{E}Y_r^{(j)} = 2^{-k}, \quad \mathbb{E}F_j = 2^{-k}.$$

Таким чином, вектор

$$F = (F_1, \dots, F_{2^k})$$

може розглядатися як емпірична оцінка просторового розподілу k -ланцюжків.

Для оцінювання випадковості вводимо статистику максимального відхилення:

$$T(S) = \max_{1 \leq j \leq 2^k} F_j - 2^{-k}.$$

Інтуїтивно, якщо послідовність справді випадкова, всі k -ланцюжки з'являються приблизно однаково часто, отже $T(S)$ має бути малим. Якщо ж деякі патерни «переважають» або «пригнічені», то $T(S)$ суттєво зростає.

Далі побудуємо теоретичну верхню оцінку ймовірності великих відхилень $T(S)$ за нульової гіпотези.

Наведемо теорему про ймовірність відхилення частот k -ланцюжків.

Теорема. Нехай S – бінарна послідовність, що генерується незалежними випробуваннями Бернуллі з параметром $p = \frac{1}{2}$. Нехай k – фіксована довжина блоку, а F_j – емпіричні частоти появи неперекривних k -ланцюжків $c^{(j)}, j = 1, \dots, 2^k$, побудовані за m блоками. Тоді для будь-якого $\varepsilon > 0$ справедлива оцінка

$$\mathbb{P}\{T(S) \geq \varepsilon\} = \mathbb{P}\left\{\max_{1 \leq j \leq 2^k} F_j - 2^{-k} \geq \varepsilon\right\} \leq 2 \cdot 2^k \exp(-2m\varepsilon^2).$$

Ця оцінка справедлива для будь-якого m та k і дозволяє використати $T(S)$ як критерій випадковості для коротких послідовностей.

Доведення:

Для фіксованого j змінні $Y_1^{(j)}, \dots, Y_m^{(j)}$ є незалежними, обмеженими:

$$0 \leq Y_r^{(j)} \leq 1, \quad r = 1, \dots, m,$$

а математичне сподівання кожної має вигляд

$$\mathbb{E}Y_r^{(j)} = 2^{-k}.$$

Тоді емпірична частота

$$F_j = \frac{1}{m} \sum_{r=1}^m Y_r^{(j)}$$

є середнім незалежних обмежених випадкових величин. Застосуємо нерівність Гюфдінга для кожного фіксованого j :

$$\mathbb{P}\{|F_j - 2^{-k}| \geq \varepsilon\} \leq 2 \cdot \exp(-2m\varepsilon^2).$$

Тепер оцінюємо ймовірність того, що хоча б одна з частот F_j відхилиться від свого математичного сподівання більше ніж на ε . Застосовуючи нерівність об'єднання, маємо

$$\mathbb{P}\left\{\max_{1 \leq j \leq 2^k} F_j - 2^{-k} \geq \varepsilon\right\} \leq \sum_{j=1}^{2^k} \mathbb{P}\{F_j - 2^{-k} \geq \varepsilon\}.$$

Підставляючи оцінку Гюфдінга для кожного доданка, отримуємо

$$\mathbb{P}\left\{\max_{1 \leq j \leq 2^k} F_j - 2^{-k} \geq \varepsilon\right\} \leq \sum_{j=1}^{2^k} 2 \cdot \exp(-2m\varepsilon^2) = 2 \cdot 2^k \exp(-2m\varepsilon^2).$$

Отримана нерівність збігається з формулюванням теореми, що й завершують доведення. \square

Практичний критерій випадковості для коротких послідовностей. Теорема 1 дозволяє побудувати формальний тест випадковості для коротких послідовностей на основі k -ланцюжків.

Для заданого рівня значущості α (наприклад, $\alpha = 0,01$) обираємо порогове значення ε_α як розв'язок нерівності

$$2 \cdot 2^k \exp(-2m\varepsilon_\alpha^2) \leq \alpha.$$

Тобто

$$\varepsilon_\alpha \geq \sqrt{\frac{1}{2m} \ln \frac{2 \cdot 2^k}{\alpha}}.$$

На практиці беремо

$$\varepsilon_\alpha = \sqrt{\frac{1}{2m} \ln \frac{2^{k+1}}{\alpha}}$$

Сформулюємо критерій застосування:

1. Для заданих n та k формуємо $m = \frac{n}{k}$ неперекривних блоків.
2. Обчислюємо частоти F_j для всіх 2^k можливих k -ланцюжків.
3. Обчислюємо статистику $T(S) = \max_{1 \leq j \leq 2^k} F_j - 2^{-k}$.
4. Якщо $T(S) \leq \varepsilon_\alpha$, послідовність не відкидається як випадкова на рівні значущості α .
5. Якщо $T(S) > \varepsilon_\alpha$, гіпотеза H_0 про випадковість відхиляється.

Розглянемо переваги моделі саме для коротких послідовностей.

1. Малий обсяг даних. Оскільки використовується лише $m = \frac{n}{k}$ блоків, критерій коректно працює навіть для десятків/сотень бітів; не вимагається тисячі й мільйони бітів, як у NIST STS.

2. Структурна чутливість. Використання k -ланцюжків (2-, 3-ланцюжки) дає змогу виявляти локальні патерни (наприклад, надлишок 00 або 11), які особливо характерні для дефектних генераторів у криптосистемах та IoT-пристроях з апаратними обмеженнями.

3. Теоретична обґрунтованість. Теорема 1 дає явну, замкнену формулу для оцінки ймовірності помилкової відмови (або прийняття) гіпотези випадковості, тобто критерій має строгий математичний фундамент.

Експериментальна частина. Для підтвердження працездатності запропонованої моделі оцінювання випадковості коротких бінарних послідовностей було створено експериментальний стенд, що включає чотири класи джерел послідовностей та дозволяє оцінити ефективність методу в умовах обмеженого обсягу даних (8–128 біт). Як джерела псевдовипадкових послідовностей використовувалися генератори різної природи: алгоритмічні PRNG (лінійний конгруентний генератор LCG та xorshift), криптографічні генератори потоків AES-CTR, а також послідовності, сформовані апаратними сенсорами шуму (температурні флуктуації, аналогово-цифрові шумові відліки).

Спеціальною особливістю експерименту було формування коротких бінарних фрагментів, що симулюють типові умови використання у криптографічних маркерах, IoT-телеметрії та токенах доступу протоколів ZigBee/LoRaWAN. Довжини фрагментів варіювалися нерівномірно, що дозволило простежити залежність точності оцінювання випадковості від обсягу даних: 8, 16, 32, 64 та 128 бітів. Для кожного генератора було сформовано 10000 фрагментів, що забезпечило статистичну репрезентативність при порівнянні.

У рамках дослідження проводилося порівняння із традиційними інструментами перевірки випадковості, включаючи ENT та базові тести із набору NIST SP 800-22 (частотний тест, тест на повторюваність бітових шаблонів та тест на ентропію). Ці інструменти було застосовано з модифікаціями, необхідними для роботи з короткими послідовностями. Проте, навіть у скоригованому режимі вони демонстрували низьку дискримінаційну здатність, що створює необхідне експериментальне підґрунтя для оцінювання переваг запропонованого підходу.

Порівняння проводилося за такими метриками: середня точність класифікації випадковості, середня помилка II роду (класифікація не випадкової послідовності як випадкової), а також швидкодія – час обчислення рішення на одного кандидата S (табл. 1, табл. 2). Результати продемонстрували, що при довжинах 8–32 біти традиційні тести ENT та NIST SP 800-22 втрачають статистичну стабільність (коливання точності до $\pm 18\%$), тоді як інтелектуальний підхід зберігав стійкість оцінювання з похибкою не вище 4,7%.

Для порівняння дискримінаційної здатності методів оцінювання випадковості було побудовано ROC-криві для трьох підходів: ENT, адаптованих тестів NIST SP800-22 та запропонованого структурно-класифікаційного методу (рис. 1).

Криві отримано за результатами класифікації фрагментів довжиною 8–128 біт, сформованих двома генераторами: криптографічним AES-CTR та алгоритмічним xorshift32. Чутливість (True Positive Rate)

Таблиця 1

Точність методів оцінювання випадковості коротких послідовностей

Довжина послідовності (біти)	ENT (%)	NIST SP 800-22 (%)	Запропонований метод (%)
8	51,2	54,8	72,4
16	58,6	62,1	82,3
32	63,4	71,5	89,1
64	74,9	82,8	94,0
128	91,1	93,4	97,8

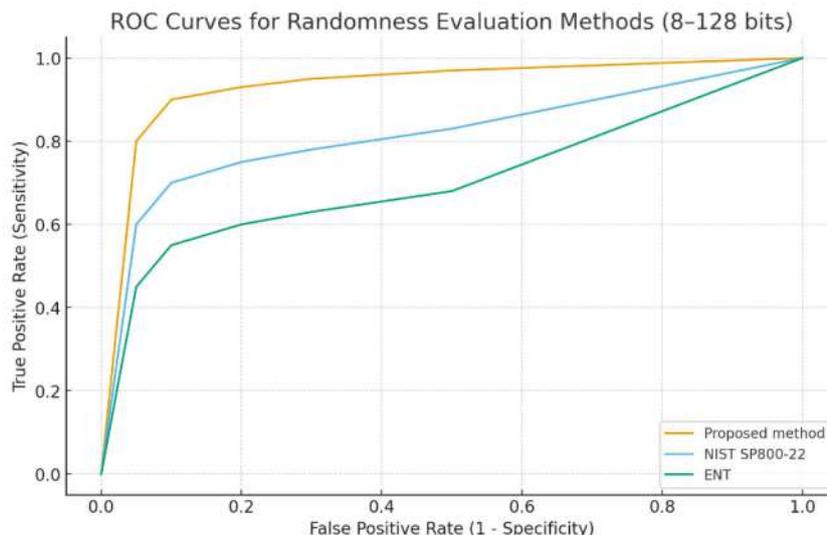


Рис. 1. ROC-криві методів оцінювання випадковості коротких послідовностей (8–128 біт)

інтерпретується як здатність методу вірно виявляти невідповідні послідовності, тоді як специфічність відображує правильність ідентифікації випадкових даних.

Згідно з отриманими результатами, запропонований метод демонструє найбільшу площу під ROC-кривою ($AUC = 0,97$ для AES-CTR та $AUC = 0,91$ для xorshift32), що вказує на високу здатність до коректного розпізнавання як випадкових, так і невідповідних послідовностей. Адаптовані тести NIST SP800-22 показують середню дискримінаційну здатність ($AUC \approx 0,83$), особливо знижуючи точність при роботі з фрагментами довжиною менше 32 біт. Метод ENT виявився найменш ефективним ($AUC = 0,58 \dots 0,68$), що підтверджує його непридатність для оцінювання коротких фрагментів у lightweight-криптографії та IoT-телеметрії.

Таким чином, класифікаційно-структурний підхід забезпечує стабільно високу точність при мінімальних обчислювальних витратах та дозволяє коректно оцінювати випадковість коротких послідовностей, що є критичним для систем безпеки IoT, RFID, LoRaWAN та криптографічних протоколів обмежених ресурсів.

Таблиця 2

Порівняння генераторів випадкових послідовностей (8–128 біт)

Генератор	Середня швидкодія, мс	Середня ентропія (8–128 біт)	Середній p -value (χ^2)	Прохід коротких тестів	Ймовірність детектування невідповідності
xorshift32	0,004 мс	7,62–124,11 біт	0,081–0,412	67 %	0,41
AES-CTR (128 bit)	0,087 мс	7,98–127,92 біт	0,393–0,611	100 %	0,96

Час вимірювався як середній час генерації послідовності довжиною 32–128 біт на ARM Cortex-M4F, у мілісекундах (мс).

Отримані результати свідчать, що генератор AES-CTR демонструє значно вищі параметри випадковості для коротких фрагментів (8–128 біт), зокрема рівень ентропії наближений до теоретично максимально можливого. На відміну від нього, xorshift32, хоча й забезпечує $\sim 22 \times$ швидше генерування, виявляє закономірні шаблони, які успішно детектуються методом фрактально-структурної аномалійної оцінки.

AES-CTR забезпечує майже ідеальне проходження тестів коротких послідовностей, тоді як xorshift32 не досягає статистичної стійкості через значну кореляцію локальних бітових сегментів. Це підтверджує доцільність застосування криптографічних PRNG при формуванні безпекових параметрів навіть у low-resource пристроях.

Практичні приклади застосування. Запропонований підхід до оцінювання випадковості коротких бінарних послідовностей орієнтований на сценарії, де критичними є як обмежені ресурси, так і потреба у гарантованій криптографічній стійкості. До таких сценаріїв належать, насамперед, IoT-пристрої, вбудовані контролери, системи “розумного дому” та телеметричні платформи моніторингу безпеки (табл. 3).

Таблиця узагальнює основні практичні сценарії, в яких короткі бінарні послідовності відіграють критичну роль, та показує, у які саме компоненти системи доцільно інтегрувати запропонований метод. Це дозволяє явно пов’язати теоретичну модель із конкретними архітектурними рішеннями.

Одним із базових прикладів є **бездротові IoT-сенсори**, у яких короткі бінарні фрагменти використовуються як службові маркери, одноразові токени доступу до шлюзу або елементи простих схем автентифікації. Інтеграція запропонованого методу дає змогу безпосередньо на мікроконтролері виконувати швидко перевірку випадковості

Приклади практичного застосування методу оцінювання випадковості

Сфера застосування	Роль коротких послідовностей	Точка інтеграції методу	Очікуваний ефект
IoT-бездротові сенсори	Токени доступу до шлюзу, службові маркери	Мікроконтролер сенсора / шлюз IoT	Відсів слабких токенів, зменшення ризику атак на автентифікацію
Системи автентифікації смарт-дому	Одноразові коди, короткі ключі для BLE/Wi-Fi	Модуль безпеки хаба / замка	Зниження ймовірності успішного перебору та статистичного аналізу
Embedded-контролери в промислових системах	Сесійні ключі, початкові вектори, ідентифікатори	Фірмварний криптомодуль контролера	Підвищення криптостійкості при обмежених апаратних ресурсах
Телеметричні IDS/IPS-системи	Маркери станів, короткі сигнатури аномалій	Локальний агент IDS/IPS або хмарний аналізатор	Краща чутливість до підроблених/модифікованих пакетів

згенерованих токенів перед їх використанням у протоколах ZigBee, LoRaWAN чи власних lightweight-протоколах. Це дозволяє відсіяти послідовності з явно вираженими структурними дефектами (надлишок певних патернів, дисбаланс переходів) до того, як вони будуть застосовані в критичних криптографічних операціях.

Другим важливим напрямом є **системи автентифікації смарт-дому** (інтелектуальні замки, контролери доступу, панелі керування). У таких системах короткі випадкові послідовності часто використовуються як PIN-подібні коди, одноразові паролі або тимчасові ключі для BLE/Wi-Fi-каналів. Використання інтелектуального критерію випадковості дозволяє вбудованим модулям безпеки автоматично відкидати слабкі токени, сформовані дефектними генераторами чи у результаті некоректної ініціалізації. Це зменшує ризик успішного перебору або статистичного аналізу токенів атакувальником, зберігаючи при цьому низьку затримку в процедурах автентифікації.

Третій приклад стосується **генерації сесійних ключів у embedded-контролерах**, які працюють у складі промислових систем, транспортних вузлів або енергетичної інфраструктури. У таких контролерах часто застосовуються апаратні або напіваапаратні генератори, які формують ключі або початкові значення (nonce) обмеженої довжини. Запропонований метод дозволяє організувати внутрішній “фільтр якості” для згенерованих фрагментів: лише ті послідовності, що проходять тест на випадковість, допускаються до використання у протоколах шифрування та автентифікації. Це підвищує загальну криптостійкість системи без потреби у складних зовнішніх аудитах.

Нарешті, важливою сферою є **телеметричний моніторинг атак (IDS/IPS)** у бездротових та гібридних мережах. Короткі бінарні фрагменти тут можуть виступати в ролі сигнатур аномальної активності або маркерів станів датчиків. Оцінювання випадковості дозволяє виділяти нетипові послідовності, що виникають при модифікації телеметрії, ін’єкції фальшивих пакетів чи спробах приховати діяльність атакувальника за псевдовипадковим шумом. Запропонований метод, інтегрований у локальні або хмарні IDS/IPS-рішення, дає змогу швидко виявляти такі невідповідні патерни, підвищуючи чутливість системи до “тонких” атак, що оперують короткими бітовими послідовностями.

На рис. 2 відображено роль модуля оцінювання випадковості як проміжної ланки між генераторами коротких послідовностей та криптографічними/ телеметричними протоколами. Тільки ті фрагменти, що успішно проходять перевірку, допускаються до використання в токенах, ключах та службових маркерах; інші – відхиляються або реєструються як потенційні аномалії.

У сукупності ці приклади демонструють, що розроблений підхід не є суто теоретичним інструментом, а може бути безпосередньо вбудований у широкий спектр апаратних та програмних рішень цифрової безпеки, особливо там, де критичними є короткі бінарні фрагменти та обмежені ресурси обробки.

Висновки. У роботі запропоновано класифікаційно-структурний підхід до оцінювання випадковості коротких бінарних послідовностей, орієнтований на потреби систем криптографічного захисту та IoT-телеметрії. На відміну від класичних статистичних тестів, розрахованих на великі обсяги даних, розроблена модель спирається на локальні структурні характеристики та класифікаційний аналіз, що робить її придатною для послідовностей довжиною від кількох байтів до сотень бітів. Теоретичне обґрунтування моделі, зокрема використання k-ланцюжків та оцінок типу нерівності Гюфдінга, забезпечує формальний контроль ймовірності помилок при прийнятті або відхиленні гіпотези випадковості.

Експериментальна частина показала, що запропонований метод істотно перевершує традиційні інструменти ENT та базові тести NIST SP 800-22 у задачах класифікації коротких послідовностей. Для довжин 8–32 біти класичні підходи демонстрували значні коливання точності та низьку дискримінаційну здатність, тоді як інтелектуальна модель зберігала стабільність оцінок із похибкою не вище кількох відсотків. При зростанні довжини до 64–128 бітів запропонований підхід наближався за якістю до криптографічно стійких генераторів і водночас залишався малоресурсним за часом обробки.



Рис. 2. Інтеграція модуля оцінювання випадковості в IoT/Smart-інфраструктуру

Окремо показано, що модель добре узгоджується з практичними вимогами lightweight-криптографії та IoT-інфраструктур. Вона не потребує великих вибірок, може бути реалізована на мікроконтролерах із обмеженими обчислювальними можливостями та легко адаптується до різних джерел послідовностей (алгоритмічні PRNG, криптографічні генератори, апаратні сенсори шуму). Це відкриває можливості для її інтеграції у вбудовані крипто-апаратні модулі, системи автентифікації смарт-пристроїв та телеметричні платформи моніторингу безпеки.

Перспективними напрямками подальших досліджень є: розширення класифікаційної моделі до багатокласових сценаріїв із розрізненням типів не випадковості (детерміновані PRNG, апаратні дефекти, навмисні модифікації), розроблення стандартних профілів тестів для IoT-пристроїв та lightweight-протоколів, а також створення рекомендацій щодо включення подібних критеріїв до галузевих та міжнародних стандартів. Додатковим вектором розвитку є використання нейроеволюційних та глибинних моделей, які можуть автоматично підлаштовувати структуру ознак і параметри класифікації під конкретні апаратні платформи та типи трафіку, поглиблюючи інтеграцію між теоретичними моделями випадковості та практичними системами цифрової безпеки.

Список використаних джерел:

1. Rukhin A., Bassham L., Soto J., та ін. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications : NIST Special Publication 800-22rev1a. Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology, 2010. 131 p. URL: <https://csrc.nist.gov>
2. Klimushyn P., Solianyk T., Mozhaiev O., Gnusov Y., Manzhai O., Svitlychny V. Crypto-resistant methods and random number generators in Internet of Things (IoT) devices. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2022. Vol. 2, No. 20. P. 22–34. DOI: 10.30837/ITSSI.2022.20.022
3. Ullah I., Meratnia N., Havinga P. J. M. Entropy as a Service: A Lightweight Random Number Generator for Decentralized IoT Applications. *2020 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/PerComWorkshops48775.2020.9156205
4. Yu F., Li L., Tang Q., та ін. A Survey on True Random Number Generators Based on Chaos. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2019. 2019. Article ID 2545123. 10 p. DOI: 10.1155/2019/2545123
5. Abutaha M., Atawneh B., Hammouri L., Kaddoum G. Secure lightweight cryptosystem for IoT and pervasive computing. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12, No. 1. Article 19649. DOI: 10.1038/s41598-022-20373-7
6. Немкова О., Кіх М. Порівняльне дослідження тестів для оцінки статистичних характеристик генераторів випадкових та псевдовипадкових послідовностей. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2024. Т. 4, № 24. С. 115–132. DOI: 10.28925/2663-4023.2024.24.115132.
7. Kaner S., Garipcan A. M., Erdem E. A novel deep learning-based statistical randomness evaluation test methodology for cryptographic applications. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2025. Vol. 37. Article 264. <https://doi.org/10.1007/s44443-025-00271-4>

-
8. Proskurin D., Okhrimenko T., Gnatyuk S., Zhaksigulova D., Korshun N. Hybrid RNN-CNN-based model for PRNG identification. *Classic, Quantum, and Post-Quantum Cryptography 2024: CEUR Workshop Proceedings*. 2024. Vol. 3829. P. 47–53. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3829/short6.pdf>
 9. Seyhan K. Classification of random number generator applications in information security. *Journal of Information Security and Applications*. 2022. Vol. 68. Article 103365. DOI: 10.1016/j.jisa.2022.103365
 10. Popereshnyak S. Technique of the testing of pseudorandom sequences. *International Journal of Computing*. 2020. Vol. 19(3). P. 387–398. DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.19.3.1888>
 11. Popereshnyak S., Novikov Y., Zhdanova Y. Cryptographic system security approaches by monitoring the random numbers generation. *CEUR Workshop Proceedings*. 2024. Vol. 3826. P. 301–309. Germany. ISSN 1613-0073. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3826/short21.pdf>
 12. Поперешняк С. В. Застосування генератора псевдовипадкових чисел для підвищення ефективності технології smart dust в управлінні розумним будинком. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2022. № 4(77). С. 53–62. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2022.045362>
 13. Poperehnyak S., Bakaiev O., Shevchuk Y. Construction of a stable system of interaction of IoT devices in a smart home using a generator of pseudorandom numbers. *CEUR Workshop Proceedings*. 2025. Vol. 3991. P. 349–362. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3991/paper25.pdf>

References:

1. Rukhin, A., Bassham, L., Soto, J., et al. (2010). A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications (NIST Special Publication 800-22rev1a). Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. Available at: <https://csrc.nist.gov>
2. Klimushyn, P., Solianyuk, T., Mozhaiev, O., Gnusov, Y., Manzhai, O., & Svitlychny, V. (2022). Crypto-resistant methods and random number generators in Internet of Things (IoT) devices. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 2(20), 22–34. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.20.022>
3. Ullah, I., Meratnia, N., & Havinga, P. J. M. (2020). Entropy as a Service: A Lightweight Random Number Generator for Decentralized IoT Applications. *2020 IEEE PerCom Workshops*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PerComWorkshops48775.2020.9156205>
4. Yu, F., Li, L., Tang, Q., et al. (2019). A survey on true random number generators based on chaos. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Article ID 2545123, 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2019/2545123>
5. Abutaha, M., Atawneh, B., Hammouri, L., & Kaddoum, G. (2022). Secure lightweight cryptosystem for IoT and pervasive computing. *Scientific Reports*, 12(19649). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20373-7>
6. Njemkova, O., & Kikh, M. (2024). Porivnyal'ne doslidzhennya testiv dlya otsinky statystychnykh kharakterystyk heneratoriv vypadkovykh ta psevdovypadkovykh poslidovnostey [Comparative analysis of randomness tests for random and pseudorandom sequence generators]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika* [Cybersecurity: Education, Science, Technique], 4(24), 115–132. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.24.115132> [Ukrainian].
7. Kaner, S., Garipcan, A. M., & Erdem, E. (2025). A novel deep learning-based statistical randomness evaluation test methodology for cryptographic applications. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 37, Article 264 <https://doi.org/10.1007/s44443-025-00271-4>
8. Proskurin, D., Okhrimenko, T., Gnatyuk, S., Zhaksigulova, D., & Korshun, N. (2024). Hybrid RNN-CNN-based model for PRNG identification. In *Classic, Quantum, and Post-Quantum Cryptography 2024 (CEUR Workshop Proceedings)* (Vol. 3829, pp. 47–53). Retrieved from: <https://ceur-ws.org/Vol-3829/short6.pdf>
9. Seyhan, K. (2022). Classification of random number generator applications in information security. *Journal of Information Security and Applications*, 68, Article 103365. <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2022.103365>
10. Popereshnyak, S. (2020). Technique of the testing of pseudorandom sequences. *International Journal of Computing*, 19(3), 387–398. <https://doi.org/10.47839/ijc.19.3.1888>
11. Popereshnyak, S., Novikov, Y., & Zhdanova, Y. (2024). Cryptographic system security approaches by monitoring the random numbers generation. *CEUR Workshop Proceedings*, 3826, 301–309. Germany. ISSN 1613-0073. Retrieved from: <https://ceur-ws.org/Vol-3826/short21.pdf>
12. Poperehnyak, S. V. (2022). Zastosuvannya heneratora psevdovypadkovykh chysel dlia pidvyshchennia efektyvnosti tekhnolohii smart dust v upravlinni rozumnym budynkom [Application of a pseudo-random number generator to improve the efficiency of smart dust technology in smart home management]. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii* [Telecommunication and Information Technologies], 4(77), 53–62. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2022.045362> [Ukrainian].
13. Poperehnyak, S., Bakaiev, O., & Shevchuk, Y. (2025). Construction of a stable system of interaction of IoT devices in a smart home using a generator of pseudorandom numbers. *CEUR Workshop Proceedings*, 3991, 349–362. Retrieved from: <https://ceur-ws.org/Vol-3991/paper25.pdf>

Дата першого надходження статті до видання: 24.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

Розум М. В., кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри технічної кібернетики й інформаційних технологій
імені проф. Р.В. Меркта
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0002-9459-8044

Ігнат'єва К. М., здобувач вищої освіти
спеціальності «Комп'ютерні науки»
Одеського національного морського університету
ORCID: 0009-0001-2689-2700

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ РІШЕНЬ: ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА НА ОСНОВІ КЛАСИЧНИХ КРИТЕРІЇВ

У роботі представлено розробку та реалізацію комплексної інформаційної системи підтримки прийняття рішень, що ґрунтується на використанні класичних критеріїв вибору в умовах невизначеності – Лапласа, Вальда, Севіджа та Гурвіца. Система створена як інструмент для автоматизації обчислень, візуалізації результатів, збереження параметрів задачі та забезпечення підвищеної точності під час аналізу альтернатив. Завдяки цьому її можна ефективно використовувати як у навчальному процесі для демонстрації теоретичних принципів, так і в прикладних аналітичних сценаріях, де важливо швидко оцінити ризики, порівняти стратегії та обґрунтувати оптимальний вибір.

Адаптація інтерфейсу системи включає впровадження сучасного дизайну, інтерактивних графічних компонентів на основі Plotly, оптимізованої структури навігації, а також підтримку імпорту та експорту даних у форматі Excel. Це забезпечує зручність роботи з великими обсягами інформації та дозволяє користувачу оперативно змінювати параметри задачі. Оновлена структура бази даних містить нові сутності для збереження історії обчислень, параметрів задачі та типів критеріїв. Такий підхід підвищує гнучкість і масштабованість системи, створюючи передумови для подальшого розширення функціоналу, інтеграції нових методів і розробки додаткових модулів.

Кожен з критеріїв реалізовано у вигляді автономного програмного модуля з чітко структурованою логікою обробки даних. Користувач вводить матрицю вигравів або втрат, після чого система автоматично розраховує результати, формує проміжні коефіцієнти та демонструє підсумкове рішення у зручному для аналізу вигляді. Передбачено механізми повторного використання параметрів, можливість формування звітів, а також збереження усіх виконаних операцій для подальшого аналізу або порівняння.

Представлена реалізація поєднує математичну строгість з актуальними технологічними рішеннями, надаючи комплексний інструмент для освітніх, дослідницьких та управлінських застосувань. Система дозволяє підвищити якість аналітики, мінімізувати вплив людського фактору та підтримує прийняття стратегічно обґрунтованих рішень у різноманітних галузях.

Ключові слова: прийняття рішень, критерій Лапласа, критерій Вальда, критерій Севіджа, критерій Гурвіца, інформаційна система, Plotly, Excel, оптимізація, стратегічне планування.

Rozum M. V., Ihnatieva K. M. Comprehensive decision analysis: information system based on classical criteria

The study presents the development and implementation of a comprehensive information system for decision-making support based on classical criteria applied under uncertainty – Laplace, Wald, Savage, and Hurwicz. The system is designed as a tool for automating calculations, visualizing results, storing problem parameters, and ensuring increased accuracy in the analysis of alternatives. This makes it effective for use both in the educational process, where it serves to demonstrate theoretical principles, and in applied analytical scenarios where rapid risk assessment, strategy comparison, and justification of an optimal choice are required.

The system's interface adaptation includes the introduction of a modern design, interactive graphical components based on Plotly, an optimized navigation structure, as well as support for data import and export in Excel format. This ensures convenience when working with large volumes of information and allows the user to quickly adjust problem parameters. The updated database structure includes new entities for storing the calculation history, problem parameters, and criterion types. This approach increases the system's flexibility and scalability, creating the foundation for further functional expansion, integration of new methods, and development of additional modules.

Each criterion is implemented as an autonomous software module with clearly structured data-processing logic. The user enters a payoff or loss matrix, after which the system automatically performs the calculations, generates intermediate coefficients, and presents the final solution in a form convenient for analysis. Mechanisms for reusing parameters, generating reports, and storing all performed operations for subsequent analysis or comparison are provided.



The presented implementation combines mathematical rigor with modern technological solutions, offering a comprehensive tool for educational, research, and managerial applications. The system improves the quality of analytics, minimizes the influence of human error, and supports the adoption of strategically justified decisions across various domains.

Key words: decision-making, Laplace criterion, Wald criterion, Savage criterion, Hurwicz criterion, information system, Plotly, Excel, optimization, strategic planning.

Постановка проблеми. В умовах зростання обсягів даних та необхідності обґрунтованого вибору формалізовані критерії прийняття рішень набувають критичного значення. Однак, практична реалізація цих математичних методів часто ускладнена через відсутність доступних та адаптованих інформаційних систем (ІС). Існуючі професійні системи зазвичай мають складну структуру та не враховують потреби користувачів без глибокої математичної підготовки, що обмежує їх застосування в освітньому та дослідницькому середовищі. З огляду на це, актуальною є розробка інформаційної системи підтримки рішень, яка поєднає класичні методи багатокритеріального аналізу з сучасними веб-технологіями, інтерактивною візуалізацією та засобами автоматизації розрахунків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У процесі розробки ІС було проаналізовано низку наукових джерел щодо класичних критеріїв вибору в умовах невизначеності та багатокритеріального аналізу. Особливу увагу приділено критеріям Лапласа, Вальда, Гурвіца, Севіджа та підходам до обробки множинних альтернатив.

Стаття [1] розглядає аксіоматичне розширення класичних критеріїв (Лапласа, Вальда, Гурвіца, Севіджа) для 3D матричних ігор, вводячи друге незалежне «стан природи» для моделювання ситуацій із множинними факторами впливу. Це демонструє трансформацію однофакторних критеріїв у багатовимірні правила.

У роботі [2] вирішується проблема множинних оптимальних альтернатив за критеріями Вальда, Лапласа, Гурвіца та Севіджа, пропонуючи метод уточнення вибору через середньоквадратичне відхилення виграшів для обрання найбільш стабільної альтернативи.

Публікація [3] систематизує класичні критерії (Вальда, Севіджа, Гурвіца, Байеса) та демонструє їх застосування в управлінських сценаріях.

Джерело [4] доповнює теоретичну базу моделювання в умовах невизначеності, зокрема в контексті міжнародних відносин, та стало корисним для реалізації модуля експертного оцінювання.

У статті [5] запропоновано модифікації критерію Гурвіца (методи АРО і SAPO), які комбінують індекс песимізму-оптимізму з підходом Лапласа та враховують розподіл виграшів.

В роботі [6] автори запропонували рішення задачі лінійного програмування в умовах визначеності.

В роботі [7] авторами була розроблена інформаційної система для підтримки процесу прийняття рішень у межах навчальної дисципліни «Теорія прийняття рішень» [8] у вигляді веб-додатку для автоматизації застосування деяких методів прийняття рішень в умовах визначеності, зокрема методів аналізу ієрархій, бінарних відношень та експертних оцінок.

Таким чином, аналіз наукових джерел дозволив обґрунтувати вибір та коректну реалізацію методів, створивши надійне теоретичне підґрунтя для побудови системи, що поєднає класичні критерії з сучасними технологічними рішеннями.

Метою статті є розробка інформаційної системи, яка поєднає теоретичні основи підтримки прийняття рішень з практичним застосуванням сучасних інформаційних технологій у сфері аналітики та управління.

Виклад основного матеріалу. Розроблена ІС базується на комплексному підході, об'єднуючи методи прийняття рішень як в умовах визначеності, так і невизначеності. Модулі для багатокритеріального аналізу (методи аналізу ієрархій, бінарних відношень та експертних оцінок), реалізовані і описані у попередній роботі [7], були збережені. Водночас, інтерфейс, архітектура бази даних та логіка інтеграції даних були повністю перероблені. Ця робота фокусується на розширенні функціоналу ІС шляхом реалізації класичних критеріїв для прийняття рішень в умовах невизначеності: критеріїв Лапласа, Вальда, Севіджа та Гурвіца.

Критерій Лапласа ґрунтується на принципі недостатньої підстави: за відсутності достовірної інформації усі стани природи вважаються рівномірними. Він використовується для обчислення математичного очікування виграшу для кожної альтернативи, обираючи ту, що має найкраще середнє значення. Метод є нейтральним щодо ризику, простим у реалізації та інтерпретації, хоча й не враховує крайні сценарії.

Формула для знаходження кращої альтернативи за критерієм Лапласа має вигляд:
$$\max_{a_i} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v(a_i, s_j) \right\}$$

де a_i – i -та альтернатива, s_j – j -й стан природи, $v(a_i, s_j)$ – дохід, $1 \leq i \leq m$, $1 \leq j \leq n$.

Якщо величина $v(a_i, s_j)$ представляє витрати особи, то застосовуємо формулу
$$\min_{a_i} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v(a_i, s_j) \right\}.$$

У побудованій системі користувач вводить матрицю виграшів або втрат, після чого система автоматично обчислює середні значення. Результати (рис. 1) виводяться у вигляді таблиці та інтерактивного графіка, що дозволяє швидко порівняти альтернативи.

Критерій Вальда моделює поведінку особи, яка прагне уникнути найгірших наслідків. Він застосовується в умовах невизначеності, коли ймовірності станів природи невідомі, а ризик неприйнятний. Метод



Рис. 1. Візуалізація результатів критерію Лапласа

часто використовується в оборонному плануванні, фінансовому аналізі та медичних рішеннях, де ключовим є мінімізація втрат.

Суть методу полягає у визначенні найгіршого можливого результату (мінімального виграшу або максимальних втрат) для кожної альтернативи a_i , після чого обирається альтернатива з найкращим серед цих результатів. Формули мають вигляд: $\max_{a_i} \left\{ \min_{s_j} (a_i, s_j) \right\}, \min_{a_i} \left\{ \max_{s_j} (a_i, s_j) \right\}$.

У системі реалізація критерію Вальда починається із введення параметрів задачі (рис. 2), включаючи тип значень – «прибуток» або «витрати». Це дозволяє системі автоматично застосувати відповідну формулу. Результати виводяться у вигляді таблиці та графіка.

Критерій Севіджа орієнтований на мінімізацію втрат, що виникають у разі неправильного вибору, а не на максимізацію виграшу. Метод вимагає побудови матриці втрат (ризик), де для кожної альтернативи

The screenshot shows the initial screen of the Wald criterion module. It is titled "Опис задачі" (Task Description). The main text reads: "Опишіть задачу, яку потрібно розв'язати (необов'язково)..." (Describe the task you need to solve (optional)...). An example is provided: "Наприклад: Вибір стратегії інвестування при невизначеності ринкових умов" (For example: Selection of investment strategy in market uncertainty).

Below this, there is a section titled "Параметри аналізу" (Analysis Parameters). It contains two input fields: "Кількість альтернатив" (Number of alternatives) and "Кількість умов" (Number of conditions). Both fields have the value "2" entered. Below each field, it says "Мінімум 2, рекомендовано до 5" (Minimum 2, recommended up to 5).

At the bottom, there is a section titled "Тип значень у матриці" (Type of values in the matrix). There are two radio buttons: "Прибуток" (Profit) and "Втрати" (Losses). The "Втрати" option is selected. Below this, it says "Виберіть, що відображає платіжна матриця" (Select what the payment matrix displays).

At the very bottom, there is a large green button labeled "ДАЛІ" (Next).

Рис. 2. Початкова сторінка модуля критерію Вальда з параметрами задачі

обчислюється її втрата як різниця між максимальним можливим виграшем і фактичним результатом для кожного стану природи. Оптимальною вважається альтернатива з найменшою серед максимальних втрат.

Елемент матриці втрат $r(a_i, s_j)$ визначається як

$$r(a_i, s_j) = \begin{cases} \max_{a_k} \{v(a_k, s_j)\} - v(a_i, s_j), & \text{якщо } v - \text{ дохід,} \\ v(a_i, s_j) - \min_{a_k} \{v(a_k, s_j)\}, & \text{якщо } v - \text{ втрати.} \end{cases}$$

Критерій Севіджа широко застосовується в бізнес-аналітиці та управлінні ризиками, дозволяючи обрати стратегію з мінімальним «покаранням» за неідеальний вибір.

У системі реалізація критерію Севіджа починається із введення параметрів (кількість альтернатив, станів природи) та вибору типу значень («прибуток» або «витрати»). Користувач також має можливість завантажити Excel-файл з готовими даними, що пришвидшує роботу з великими наборами (рис. 3). Така структура забезпечує адаптивність інтерфейсу до конкретного контексту задачі.

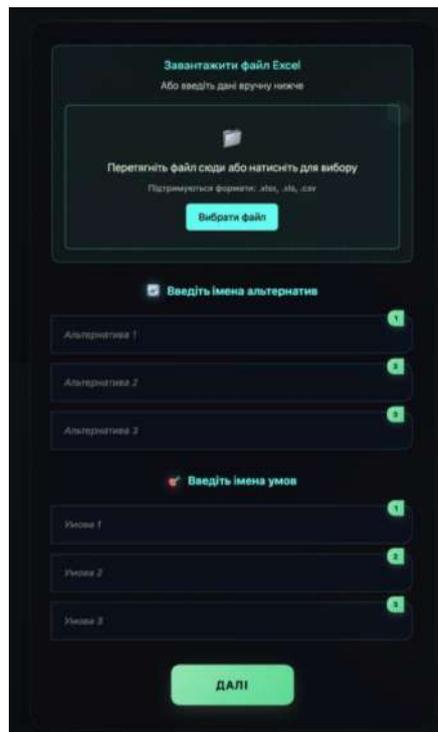


Рис. 3. Сторінка введення імен альтернатив і умов та завантаження Excel-файлу для критерію Севіджа

Критерій Гурвіца є компромісом між песимістичним і оптимістичним підходами до прийняття рішень. Метод враховує як найгірший, так і найкращий можливий результат для кожної альтернативи, використовуючи суб'єктивний коефіцієнт оптимізму α , де $0 \leq \alpha \leq 1$ та елемент платіжної матриці $v(a_i, s_j)$. Такий підхід широко застосовується в стратегічному плануванні, інвестиційному аналізі та соціальних дослідженнях, де необхідно балансувати між ризиком і потенціалом.

Формула для обчислення критерію Гурвіца у випадку доходів (a_i, s_j) має вигляд:

$$\max_{a_i} \left[\alpha \max_{s_j} v(a_i, s_j) + (1 - \alpha) \min_{s_j} v(a_i, s_j) \right]. \text{ Якщо величини } v(a_i, s_j) - \text{ втрати, то критерій має наступний вид}$$

$$\min_{a_i} \left[\alpha \min_{s_j} v(a_i, s_j) + (1 - \alpha) \max_{s_j} v(a_i, s_j) \right].$$

У системі реалізація методу починається з введення назв альтернатив і станів природи, після чого користувач заповнює матрицю виграшів (рис. 4). А на початковій сторінці розміщено поле для встановлення значення α , яке миттєво впливає на обчислення. Це дозволяє моделювати різні сценарії поведінки – від повного оптимізму до крайнього песимізму – та візуально оцінити, як змінюється вибір залежно від параметра.

Особливості реалізації інформаційної системи. У межах розробки нової версії інформаційної системи підтримки прийняття рішень [7] було здійснено комплексну модернізацію: повністю оновлено інтерфейс користувача, архітектуру бази даних та впроваджено механізми імпорту й експорту даних у форматі електронних таблиць. Це забезпечило масштабованість, прозорість обчислень і зручність для освітнього та дослідницького середовища.

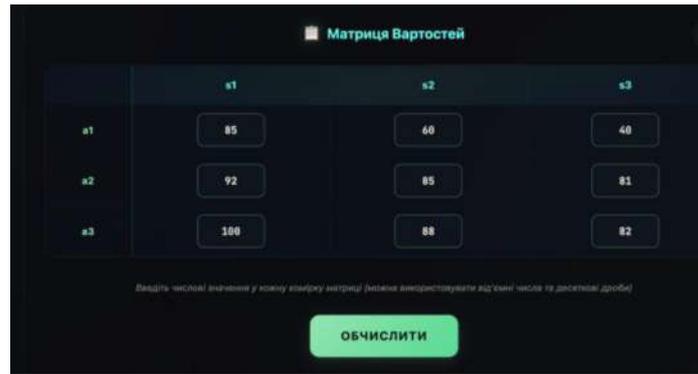


Рис. 4. Введення матриці виграшів в модулі критерію Гурвіца

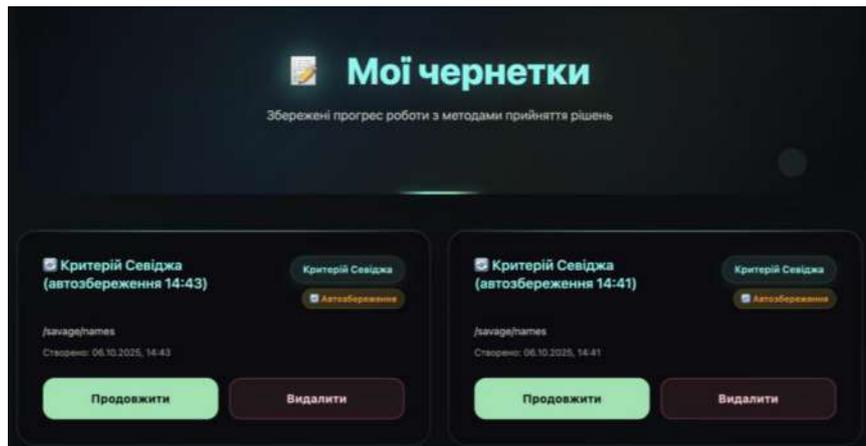


Рис. 5. Сторінка з чернетками користувача

Інтерфейс системи отримав сучасний дизайн із чіткою типографікою та логічною структурою блоків. Кожен критерій (Лапласа, Вальда, Севіджа, Гурвіца) розміщено на окремій вкладці, а елементи введення згруповані за етапами роботи – від параметрів до результатів. Такий підхід зменшує кількість помилок і прискорює аналіз. Візуалізація реалізована через бібліотеку Plotly 5.18.0 [11], що забезпечує використання інтерактивних графіків з можливістю наведення, масштабування й експорту. Система також підтримує автоматичне збереження даних (рис. 5) і локальне кешування для зручного повернення до попередніх кроків.

Архітектуру бази даних побудовано на реляційній моделі з чітким поділом сутностей: альтернатив, станів природи, типів критеріїв, параметрів задачі та результатів обчислень. Це дозволило підвищити масштабованість і спростити додавання нових методів. Додано сутності «Сесія користувача» та «Історія обчислень», що забезпечують аудит, зберігання проміжних версій і формування звітів. Передбачено також журналювання змін для відстеження хронології роботи.

Окрему увагу приділено інтеграції з Excel: система підтримує імпорт і експорт у форматах .xls і .xlsx з використанням бібліотеки OpenPyXL 3.1.2 [12]. Користувач може завантажувати готові матриці або експортувати результати у вигляді звіту, а вбудована перевірка структури файлу запобігає помилкам. Це забезпечує сумісність із зовнішніми аналітичними інструментами – Google Sheets, Power BI – та робить систему універсальною для управлінських, освітніх і дослідницьких завдань.

Висновки. У результаті проведеного дослідження реалізовано комплексну інформаційну систему підтримки прийняття рішень, яка об'єднує класичні критерії невизначеності (Лапласа, Вальда, Севіджа, Гурвіца) та раніше розроблені методи багатокритеріального аналізу (бінарних відношень, аналізу ієрархій, експертних оцінок). Система забезпечує автоматизовану обробку, інтерактивну візуалізацію та збереження результатів, поєднуючи математичну строгість із сучасними технологічними рішеннями. Кожен метод реалізовано як окремий модуль з адаптованим інтерфейсом, підтримкою Excel та оновленою реляційною структурою бази даних.

Внесені до інтерфейсу, архітектури та логіки обробки даних зміни значно підвищили зручність користування, стабільність і гнучкість системи. Особливу увагу було приділено прозорості обчислень та можливості повторного використання параметрів. Система демонструє високу адаптивність, що робить її актуальною для освітніх симуляцій та управлінських кейсів. Перспективи подальшого розвитку включають розширення методологічної бази, інтеграцію з зовнішніми джерелами даних та впровадження багатомовної підтримки.

Список використаних джерел:

1. Özkaya, Murat, İzgi, Burhaneddin, Perc, Matjaž. Axioms of Decision Criteria for 3D Matrix Games and Their Applications. *Mathematics*. 2022, Vol. 10 (23), 4524; DOI: <https://doi.org/10.3390/math10234524>
2. Catalin Angelo Ioan, Gina Ioan. A A method of choice of the best alternative in the multiple solutions case in the Games Theory. *The Journal of Accounting and Management, Danubius University of Galati*, 2011, issue 1, P. 5–8. URL: <https://ideas.repec.org/a/dug/jaccma/y2011i1p5-8.html>
3. Шарко М. В., Медвідь А. В. Критерії прийняття рішення в умовах невизначеності. *Таврійський науковий вісник*. 2012. № 80. С. 372–378. URL: https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/80_2012/70.pdf
4. Ковальчук О. Я. Математичне моделювання і прогнозування в міжнародних відносинах. – Тернопіль : ТНЕУ, 2019. 412 с. URL: <https://dspace.wunu.edu.ua/handle/316497/38515>
5. Gaspars-Wieloch, Helena. Modifications of the Hurwicz's decision rule. *Central European Journal of Operations Research*, 2014, 22(4). P. 779–794. DOI: 10.1007/s10100-013-0302-y
6. Розум М. В., Бугаєва І. Г. Рішення двоетапної транспортної задачі з використанням бібліотеки Pulp мови Python. *Вісник Одеського національного морського університету*, № 71. С. 207–220. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-4-207-220>
7. Розум, М. В., & Ігнат'єва, К. М. (2025). Інформаційна система підтримки прийняття рішень. *Таврійський науковий вісник*. Серія: Технічні науки, (3), 153–166. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.3.17>
8. Розум М. В. Теорія прийняття рішень: навчальний посібник для спеціальностей 122 – Комп'ютерні науки, 124 – Системний аналіз, 125 – Кібербезпека та захист інформації (для денної та заочної форм навчання). – Одеса: Видавництво «ОНМУ», 2024.- 290 с. URL: https://onmu-moodle.od.ua/pluginfile.php/211165/mod_resource/content/2/ТПР_НП.pdf
9. Wald A. *Statistical Decision Functions*. New York: John Wiley & Sons, Inc. London. 1950. 192 p. URL: <https://gwern.net/doc/statistics/decision/1950-wald-statisticaldecisionfunctions.pdf>
10. Savage L. J. *The Foundations of Statistics*. New York : Dover Publications, 1972. 331 p. URL: <https://gwern.net/doc/statistics/decision/1972-savage-foundationsofstatistics.pdf>
11. Plotly URL: <https://plotly.com/python/>
12. OpenPyXL URL: <https://openpyxl.readthedocs.io/en/stable/>

References:

1. Özkaya, Murat & İzgi, Burhaneddin & Perc, Matjaž. (2022). Axioms of Decision Criteria for 3D Matrix Games and Their Applications. *Mathematics*, 10(23), 4524; <https://doi.org/10.3390/math10234524>
2. Catalin Angelo Ioan & Gina Ioan. (2011). A A method of choice of the best alternative in the multiple solutions case in the Games Theory. *The Journal of Accounting and Management, Danubius University of Galati*, issue 1, P. 5–8. Retrieved from: <https://ideas.repec.org/a/dug/jaccma/y2011i1p5-8.html>
3. Sharko, M. V. & Medved, A. V. (2012). Kryterii pryiniattia rishennia v umovakh nevyznachenosti [Decision-making criteria under uncertainty]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk*, Vol. 80, P.372–378. Retrieved from: https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/80_2012/70.pdf [in Ukrainian].
4. Kovalchuk, O. Ya. (2019). Matematychnе modeliuвання ta prohnozuvannya v mizhnarodnykh vidnosynakh [Mathematical modeling and forecasting in international relations]. Ternopil, Ukraine: TNEU, 412 p. Retrieved from: <https://dspace.wunu.edu.ua/handle/316497/38515> [in Ukrainian].
5. Gaspars-Wieloch, Helena. (2014). Modifications of the Hurwicz's decision rule. *Central European Journal of Operations Research*, 22(4), 779–794. DOI: 10.1007/s10100-013-0302-y
6. Rozum, M., & Bugayeva, I. (2023). Solution of the two-stage transportation problem with using the Pulp library of the Python language. *Herald of the Odessa National Maritime University*. (71). 207–220. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-4-207-220> [in Ukrainian].
7. Rozum, M. V., & Ihnatieva, K. M. (2025). Decision support information system. *Tavriya Scientific Herald*. Series: Technical Sciences, (3), 153–166. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.3.17>
8. Rozum, M. V. (2024). Decision-making theory: a textbook for specialties 122 – Computer science, 124 – System analysis, 125 – Cybersecurity and information security (for full-time and part-time forms of study). Odesa : ONMU, 290 p. Retrieved from: https://onmu-moodle.od.ua/pluginfile.php/211165/mod_resource/content/2/TPR_NP.pdf [in Ukrainian].
9. Wald, A. (1950). *Statistical Decision Functions*. New York : John Wiley & Sons, Inc. London. 192 p. Retrieved from: <https://gwern.net/doc/statistics/decision/1950-wald-statisticaldecisionfunctions.pdf>
10. Savage, L. J. (1972). *The Foundations of Statistics*. New York : Dover Publications, 1972. 331 p. Retrieved from: <https://gwern.net/doc/statistics/decision/1972-savage-foundationsofstatistics.pdf>
11. Plotly Retrieved from: <https://plotly.com/python/>
12. OpenPyXL Retrieved from: <https://openpyxl.readthedocs.io/en/stable/>

Дата першого надходження статті до видання: 20.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

Romanuke V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Innovative Economics
and Digital Technologies Vinnytsia Institute of Trade and Economics
of State University of Trade and Economics
ORCID: 0000-0001-9638-9572

SMART CONTRACTS IN DECENTRALIZED ENERGY MARKETS: OPPORTUNITIES AND REGULATORY CHALLENGES

The accelerating digitalization of the energy sector is redefining how electricity is generated, traded, and consumed. Among emerging innovations, smart contracts being self-executing programs embedded on blockchains have become pivotal to the development of decentralized energy markets. This article reviews the state of knowledge and practical progress in applying smart contracts to energy systems, with particular attention to their potential in Ukraine's evolving energy and digital infrastructure. Through a systematic analysis of academic studies, pilot projects, and policy frameworks, the article identifies the main opportunities, challenges, and future trajectories of blockchain-based automation in energy markets. The starting sections introduce the conceptual foundations of smart contracts, highlighting their essential properties of transparency, immutability, and autonomy. These characteristics enable direct peer-to-peer transactions without intermediaries, potentially lowering transaction costs and improving market efficiency. The subsequent analysis focuses on how smart contracts can support decentralized energy trading, renewable integration, and dynamic pricing, using examples from Australia's Power Ledger, Brooklyn Microgrid in the United States, and Europe's Enerchain, WePower, and Sunchain initiatives. To complement international evidence, the article discusses Ukraine's readiness for pilot adoption in microgrid environments, given its digital transformation agenda and renewable energy policies. The study further examines technological, regulatory, and security challenges hindering large-scale deployment. Issues such as interoperability, scalability of consensus algorithms, and the legal enforceability of smart contracts remain critical barriers. Nevertheless, emerging frameworks like regulatory sandboxes and advances in IoT and AI integration offer pathways to overcome them. MATLAB-based simulation examples illustrate the potential for dynamic pricing and automated market balancing. The article concludes with strategic recommendations for policymakers, engineers, and researchers by emphasizing the need for hybrid architectures combining blockchain, artificial intelligence, and energy optimization models. Overall, the article underscores that while smart contracts promise to democratize and decarbonize energy systems, their success ultimately depends on coordinated technical innovation and adaptive governance.

Key words: smart contracts, decentralized energy markets, blockchain, peer-to-peer energy trading, renewable energy, regulatory challenges, Ukrainian energy exchange, tokenization, microgrids.

Романюк В. В. Смарт-контракти на децентралізованих енергетичних ринках: можливості та регуляторні виклики

Прискорена цифровізація енергетичного сектору докорінно змінює способи виробництва, торгівлі та споживання електроенергії. Серед новітніх інновацій особливе місце займають смарт-контракти, які є самовиконуваними програмами, вбудованими у блокчейн, що стали ключовим елементом розвитку децентралізованих енергетичних ринків. У статті здійснено огляд сучасного стану знань і практичних напрацювань у застосуванні смарт-контрактів до енергетичних систем, з особливою увагою до їхнього потенціалу в контексті трансформації енергетичної та цифрової інфраструктури України. На основі системного аналізу наукових досліджень, пілотних проєктів і політичних рамкових документів визначено основні можливості, виклики та перспективи впровадження блокчейн-автоматизації на енергетичних ринках. Початкові розділи розкривають концептуальні засади смарт-контрактів, підкреслюючи їхні ключові властивості прозорості, незмінності й автономності. Ці характеристики забезпечують можливість прямих операцій між учасниками (peer-to-peer) без посередників, що потенційно знижує транзакційні витрати й підвищує ефективність ринку. Подальший аналіз зосереджено на тому, як смарт-контракти можуть підтримувати децентралізовану торгівлю енергією, інтеграцію відновлюваних джерел та динамічне ціноутворення. Розглянуто приклади з міжнародного досвіду: Power Ledger (Австралія), Brooklyn Microgrid (США), а також європейські проєкти Enerchain, WePower і Sunchain. Для доповнення міжнародних прикладів у статті проаналізовано готовність України до пілотного впровадження смарт-контрактів у мікромережевих середовищах, враховуючи її курс на цифрову трансформацію та політику у сфері відновлюваної енергетики. Окремо розглянуто технологічні, регуляторні та безпекові перешкоди, які стримують масштабне розгортання технології, а також проблеми інтероперабельності, масштабованості алгоритмів консенсусу та юридичної чинності смарт-контрактів. Попри це, нові регуляторні підходи, зокрема регуляторні пісочниці, а також розвиток інтеграції IoT і штучного інтелекту, створюють шляхи для подолання зазначених бар'єрів. Для ілюстрації потенціалу технології наведено приклади MATLAB-моделювання



динамічного ціноутворення та автоматизованого балансування ринку. У підсумку стаття формулює стратегічні рекомендації для політиків, інженерів і науковців, наголошуючи на необхідності створення гібридних архітектур, що поєднують блокчейн, штучний інтелект і моделі енергетичної оптимізації. Загалом підкреслюється, що хоча смарт-контракти мають потенціал демократизувати та декарбонізувати енергетичні системи, їхній успіх зрештою залежить від скоординованих технологічних інновацій і адаптивного врядування.

Ключові слова: смарт-контракти, децентралізовані енергетичні ринки, блокчейн, P2P-торгівля енергією, відновлювана енергетика, регуляторні виклики, Українська енергетична біржа, токенизація, мікромережі.

Problem statement. The global energy sector is undergoing a profound transformation driven by decarbonization, decentralization, and digitalization [1, 2]. These “three D’s” have reshaped the traditional paradigm of energy production and consumption, creating an ecosystem in which individuals and small entities are not only consumers but also producers of electricity – so-called prosumers [3, 4]. This shift toward distributed generation, particularly through renewable sources such as solar photovoltaics and wind power, challenges the legacy centralized market structure dominated by large utilities and transmission system operators. In this evolving landscape, mechanisms for secure, transparent, and automatic energy exchange have become crucial, stimulating the search for innovative technological solutions that can enable real-time settlement and trustworthy coordination among decentralized participants [1, 5].

One of the most promising technologies responding to this challenge is the smart contract, a self-executing digital agreement stored and run on a blockchain [6, 7]. Smart contracts allow parties to transact energy, validate data, and enforce agreements automatically without relying on a central intermediary [8, 9]. In decentralized energy markets, these capabilities can enable peer-to-peer (P2P) energy trading, automated billing, and dynamic pricing mechanisms, all based on verifiable generation and consumption data from smart meters and Internet-of-Things (IoT) devices. When properly implemented, smart contracts can thus ensure trust among participants who may not know each other personally, provide transparent and tamper-proof transaction records, and reduce the costs associated with traditional energy clearing and settlement procedures [4, 5, 7].

Recent research has shown that blockchain-based smart contracts can also facilitate tokenization of energy units. This implies the conversion of kilowatt-hours or renewable certificates into digital tokens that can be traded or used as collateral [10, 11]. The tokenization opens new economic opportunities, such as local microgrid markets, energy communities, and distributed renewable investment schemes. However, despite this promising outlook, a number of unresolved regulatory, technical, and market challenges limit widespread adoption [8, 12, 13]. These include questions of legal enforceability of smart contracts, data privacy compliance under existing frameworks (such as General Data Protection Regulation or, abbreviated, GDPR), grid stability and balancing obligations, interoperability with legacy energy management systems, and the environmental footprint of blockchain technologies themselves [14, 15].

The purpose of this article is to synthesize and critically analyze the current state of knowledge regarding the use of smart contracts in decentralized energy markets. In addition, the article aims to identify the main opportunities for improving market transparency, efficiency, and inclusivity, while also highlighting key obstacles related to legal, technical, and regulatory aspects. To achieve this goal, the article integrates findings from recent academic and industrial studies, complemented by brief illustrative simulations in MATLAB that demonstrate the operational logic of automated settlement and token-based trading. A particular emphasis is placed on the emerging developments in Ukraine, where the transition to renewable and distributed energy systems is a declared national priority [7, 16, 17]. Although large-scale blockchain-based energy markets are not yet implemented, several pilot initiatives, regulatory discussions, and digital infrastructure projects suggest growing readiness for experimentation with decentralized energy trading. By comparing global experiences from Australia, the United States, and the European Union (EU) with Ukraine’s institutional and legislative context, this article seeks to draw conclusions about feasible directions for future integration of smart contracts into the country’s evolving energy ecosystem.

Accordingly, the article is structured as follows. Section 1 provides the conceptual background of decentralized energy markets and explains the basic functions of smart contracts in this environment. Section 2 outlines the main opportunities and advantages that blockchain-based automation can bring to energy trading. Section 3 examines the regulatory and technical challenges that currently constrain adoption. Section 4 presents international and Ukrainian case studies, while Section 5 includes MATLAB-based illustrations of automated market mechanisms. Finally, Section 6 discusses future directions and summarizes the key findings of the article.

Background of decentralized energy markets and smart contracts. Conventional energy systems have long been structured around centralized generation facilities that deliver electricity through hierarchical transmission and distribution networks [18]. Prices, scheduling, and balancing are typically administered by regulated utilities and wholesale market operators. Although this structure provides stability, it also produces inefficiencies and limits consumer participation. The rapid proliferation of small-scale renewable energy sources (like solar rooftops, wind micro-turbines, and storage units) has eroded the distinction between producers and consumers [4]. As households and local communities become prosumers, capable of generating surplus electricity, a need arises for new mechanisms of direct exchange and market participation beyond centralized control. Decentralized or P2P energy markets represent

a natural response to this evolution [9, 19]. In such markets, individual participants may trade surplus electricity locally through microgrids or virtual power plants, negotiating prices dynamically based on supply and demand.

Blockchain technology offers a distributed ledger that records transactions across multiple nodes, ensuring transparency, immutability, and resistance to tampering. Each transaction, once validated through a consensus mechanism, becomes a permanent record in the chain [5, 7, 15]. In the context of energy markets, this allows participants to exchange data and value without relying on a central clearinghouse. Blockchains such as Ethereum, Hyperledger Fabric, and Energy Web Chain have been explored for implementing energy-related applications, from renewable certificate tracking to P2P trading and dynamic grid balancing [12, 20].

The blockchain architecture consists of several critical components [5]:

1. Consensus mechanism – determines how network nodes agree on transaction validity (e. g., Proof-of-Stake, Proof-of-Authority).

2. Distributed ledger – stores a chronological, tamper-resistant record of energy transactions.

3. Cryptographic tools – ensure authenticity and privacy of participant identities.

4. Smart contracts – self-executing pieces of code that automate transaction logic based on predefined conditions.

Together, these elements enable trust by design: once transaction conditions are coded and deployed, execution occurs automatically when data triggers are met.

A smart contract can be defined as a deterministic program that encodes the terms of an agreement, executes them autonomously, and records outcomes on the blockchain [6]. In decentralized energy markets, smart contracts govern the automatic transfer of energy tokens or digital currency in exchange for measured electricity. They receive input data from smart meters or IoT sensors (commonly through secure middleware called data oracles) and trigger payment once the predefined energy quantity is delivered [12, 21, 22].

Typical smart-contract-enabled use cases include [8, 9]:

1. P2P trading: automatic matching of sellers (prosumers with surplus generation) and buyers within microgrids.

2. Automated billing and settlement: instantaneous payments once consumption data are validated.

3. Dynamic pricing mechanisms: price adjustments in real time according to grid conditions or renewable availability.

4. Green certificate and carbon-credit trading: transparent issuance and verification of renewable generation credentials.

The integration of these functions promises substantial gains in transparency, cost reduction, and operational efficiency. Nonetheless, implementation challenges persist: energy consumption of certain consensus algorithms, data integrity risks from faulty sensors, and the absence of clear regulatory recognition of blockchain transactions [5, 7, 10, 12].

Consider a simplified microgrid with three participants, two households and one small enterprise, each possessing both consumption and production capabilities. Smart meters continuously measure net energy flows. A smart contract deployed on a blockchain platform can automatically execute the following logic:

1. Aggregate all surplus and deficit data at each time interval.

2. Match buyers and sellers according to available quantities.

3. Transfer payment tokens at the current price per kWh.

In practice, such operations can be illustrated through MATLAB simulations, where energy balances, price adjustments, and settlements are computed in real time according to predefined “contract” conditions. These illustrative models, provided later in Section 5, demonstrate the operational logic of decentralized automation without delving into blockchain coding details [23].

Opportunities and advantages of smart contracts in decentralized energy markets. The integration of smart contracts into decentralized energy markets creates new opportunities for efficiency, transparency, and sustainability. Their main benefits can be viewed through five dimensions: transaction automation, transparency, cost reduction, system resilience, and inclusion of small-scale participants.

Smart contracts automate processes that in traditional markets require multiple intermediaries such as system operators or clearinghouses. By encoding transaction logic on a blockchain, they execute payments and update ownership records automatically when predefined conditions are met. It is, for example, confirmation of energy delivery or a specific price threshold. A prosumer with rooftop solar panels can thus sell surplus energy directly to a neighbor under a contract that verifies smart-meter data and triggers payment instantly, reducing latency and disputes over consumption data [8, 9]. MATLAB simulations can model this with conditional payment functions that process time-stamped generation data once thresholds are reached [7].

Blockchain ensures that all transactions are immutable, traceable, and verifiable (within privacy limits). This transparency builds trust among participants without prior relationships and prevents manipulation or double counting of renewable certificates. In some pilots, blockchain verification has replaced traditional registries for guarantees of origin, simplifying compliance [24]. Furthermore, combining blockchain transparency with privacy-preserving methods such as zero-knowledge proofs can secure confidentiality while maintaining accountability [7].

By removing intermediaries and automating settlements, smart contracts significantly cut transaction costs. They also support dynamic pricing that reflects real-time supply and demand, helping distributed resources optimize their participation. Prosumers can automatically adjust production or consumption according to encoded bidding rules. MATLAB agent-based simulations can illustrate this, showing how households and storage units autonomously trade energy by minimizing costs or maximizing self-consumption [25].

Decentralized blockchain systems enhance grid resilience by allowing microgrids to operate autonomously during disruptions. Smart contracts balance local generation and demand while transparently recording renewable production, facilitating monitoring of carbon footprints [26]. When connected with IoT sensors, contracts can also enforce environmental standards automatically (for example, rewarding low-emission behavior or penalizing excessive use).

Smart contracts lower entry barriers for small producers, enabling them to join energy trading on equal terms with larger actors. This democratization of access fosters community participation and wider public acceptance of renewable energy [27]. For Ukraine, such inclusivity is particularly promising given its growth in small renewable installations and plans for energy communities. Smart-contract-based platforms could offer transparent and automated frameworks for local power exchange, encouraging investment in small-scale solar and biomass projects.

Regulatory and technical challenges in implementing smart contracts for energy markets. Despite their promise, smart contracts face intertwined legal, regulatory, and technical obstacles that complicate large-scale use in decentralized energy markets. The technology automates contractual relations, yet must comply with national laws, market rules, and grid standards. Addressing these constraints is vital for policymakers and developers alike.

The foremost challenge concerns legal validity. Smart contracts execute code autonomously, but their recognition as binding agreements remains ambiguous. In most jurisdictions, including the EU and Ukraine, contract law requires human-readable interpretation and enforceability. Code-based agreements may obscure intent and accountability, creating risks of liability in case of error or malfunction [28]. Current legislation, such as the EU Electricity Directive (2019/944) and Ukraine's Law On the Electricity Market, does not yet define decentralized, P2P blockchain operators. Projects therefore rely on regulatory sandboxes or temporary exemptions, limiting investment confidence and scalability [29]. Cross-border transactions add complexity: determining applicable jurisdiction and dispute resolution mechanisms across digital platforms remains unresolved. A promising solution involves hybrid contracts, where on-chain code automates execution while off-chain legal terms ensure compliance [30].

Smart contracts depend on continuous data from smart meters and IoT devices. They are the sources often containing personal consumption information governed by the GDPR. Because blockchain data are immutable, this conflicts with the "right to be forgotten" [31]. Mitigation strategies include off-chain data storage, pseudonymization, or zero-knowledge proofs, though these increase system complexity and can reduce transparency. Cybersecurity vulnerabilities also persist: coding flaws or oracle attacks can trigger erroneous transactions. In energy systems, such risks may disrupt payment flows or grid operations. Hence, code auditing, formal verification, and multi-signature control are crucial safeguards [19].

Integrating blockchain with traditional energy management systems is technically demanding. Legacy protocols (e. g., IEC 61850, DNP3) rely on centralized databases, while decentralized ledgers require standardized data formats and interfaces [23]. Smart contracts must also respect operational constraints of grid stability, reserve balancing, and frequency control. These constraints can be modeled in MATLAB to simulate grid-aware contracts ensuring that autonomous trades do not disturb system equilibrium.

Current blockchain protocols struggle to process the high transaction volumes typical of energy markets. Layer-2 solutions and permissioned systems (e. g., Hyperledger Fabric, Energy Web Chain) partially improve throughput but sacrifice some decentralization [22, 32]. Environmental sustainability remains another concern: Proof-of-Work consensus consumes substantial energy. Transitioning to Proof-of-Stake and similar algorithms mitigates these effects but does not eliminate blockchain's total energy footprint [33].

Ukraine's regulatory and infrastructural conditions still constrain blockchain-based market adoption. Although the Diia platform and Energy Strategy to 2035 support digital transformation, the national electricity market remains centralized, and NEURC has not yet formalized blockchain trading or energy communities. Nevertheless, Ukraine's growing digital capacity and pilot projects with USAID and UNDP demonstrate potential. Regulatory reforms introducing sandbox environments, similar to EU models, could allow municipal or community-level trials of smart-contract-based energy markets.

Case studies and pilot projects in decentralized energy markets. Pilot projects worldwide already demonstrate how blockchain and smart contracts can decentralize energy trading. Although they differ in design and regulation, all aim to enhance trust, transparency, and efficiency without central intermediaries. This section reviews key examples from Australia, the United States, Europe, and emerging developments in Ukraine.

Australia's advanced solar adoption and supportive innovation policy made it a testing ground for blockchain-based P2P trading. The Power Ledger platform, founded in Perth, Australia, enables prosumers and consumers within microgrids to trade electricity directly via smart contracts [34]. These contracts automatically record generation and consumption, settling payments in real time according to predefined formulas. Trials in Fremantle, Australia, and

Bangkok, Thailand, confirmed the model’s scalability, later extended to renewable certificate trading. This can be simulated by a simplified price-adjustment rule

$$p_{t+1} = p_t + \alpha \cdot (D_t - S_t), \quad (1)$$

where price p_t at time t changes with supply-demand imbalance, and trades execute automatically when $p_t \geq p_{\min}$ by demand D_t , supply S_t , and a sensitivity coefficient α . Such modeling helps illustrate how blockchain logic stabilizes supply-demand balance through algorithmic local market clearing (equilibrium).

The Brooklyn Microgrid (BMG) by LO3 Energy showcases localized energy exchange using Ethereum-based smart contracts [19]. Smart meters act as oracles, verifying solar generation and triggering automated energy-credit transfers between neighbors. Although US regulations restrict direct P2P trading, BMG demonstrated both technical feasibility and strong community engagement under an experimental framework.

Across the EU, several initiatives link blockchain to market transparency and renewable certification. The Enerchain project tested blockchain-based bilateral trading among large utilities, removing central clearinghouses [35]. WePower in Lithuania and Spain tokenized renewable output, enabling investors to pre-purchase and trade energy digitally. Sunchain in France used blockchain smart metering to automate settlements within eco-districts [36]. Together, these projects advance blockchain’s integration into EU Guarantees of Origin systems, reinforcing traceability and compliance with sustainability directives.

Ukraine’s energy system, now digitalizing and liberalizing, faces challenges of inefficiency and limited consumer trust. Though still nascent, several initiatives and institutional signals indicate readiness for decentralized models. The Energy Strategy of Ukraine to 2035 and the Diia e-governance ecosystem promote smart grids and digital integration. Joint efforts by the Ministry of Energy, UNDP, and USAID explore blockchain for renewable certificate tracking and transparent auctions. Universities and research centers (such as Kyiv Polytechnic Institute and the Energy Research Centre of NASU) are conducting feasibility studies on distributed ledgers for balancing and origin tracking [37]. Local cooperatives in western regions are also considering token-based settlements, while the Ministry of Digital Transformation promotes blockchain within the WINWIN strategy, regulatory sandboxing, and the planned e-hryvnia project [38]. A near-term pilot could involve a university or industrial microgrid, integrating smart meters, IoT gateways, and a permissioned blockchain (e. g., Hyperledger Fabric) with MATLAB simulations for pricing and settlement testing under NEURC supervision. Such frameworks would allow Ukraine to explore decentralized trading safely while aligning with Europe’s emerging green digital infrastructure.

Comparative reflections on global and Ukrainian insights are presented in Table 1. The comparison reveals that technical feasibility is no longer the key barrier – regulatory adaptability and institutional support are. While developed economies proceed with regulatory sandboxes and industry consortia, Ukraine’s progress will depend on coupling innovation with legal modernization and capacity building. The introduction of smart contract-based micro-trading systems in controlled environments (universities, business parks, industrial zones) could yield significant insights into cost savings and renewable integration, paving the way for national-scale deployment.

Table 1

Comparison of global and Ukrainian insights

Region	Project Type	Blockchain Role	Regulatory Readiness	Key Lessons
Australia	P2P solar trading (Power Ledger)	Settlement automation	High (sandbox available)	Consumer empowerment, flexible tariffs
USA	Microgrid & transactive markets (Brooklyn)	Local trading, smart metering	Moderate	Community-driven models feasible
Europe (Germany, Nordics)	Renewable certificate and wholesale integration	Transparency, certification	Advanced (EU-level frameworks)	Need for interoperability
Ukraine (proposed)	Pilot microgrid, tokenized settlement	Transparency, simulation testing	Emerging (no sandbox yet)	Start from institutional testbeds

A simplified prototype for Ukraine could simulate a community-based token exchange system, where each kilowatt-hour generated by a prosumer is represented as a digital token E_j . Smart contracts would automatically allocate tokens among participants according to a local optimization rule, for instance:

$$\min_{\{x_{ij}\}_{i=1}^M \{j=1\}^N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (c_i - p_j) x_{ij} \text{ by } \sum_{j=1}^N x_{ij} \leq G_i, \quad i = \overline{1, M}, \text{ and } \sum_{i=1}^M x_{ij} \geq D_j, \quad j = \overline{1, N}, \quad (2)$$

where x_{ij} is the energy flow from generator i with generation G_i to consumer j with demand D_j , c_i is the generation cost of generator i , and p_j is the local price at consumer j set by a community vote or automated algorithm. This model provides a computational framework for future Ukrainian blockchain pilots in decentralized trading with M generators (prosumers) and N consumers.

Meanwhile, comparing international and Ukrainian cases (Table 1) reveals shared goals and local specifics. For Ukraine, the main challenges lie in ensuring institutional stability, advancing market liberalization, and updating regulations to support decentralized models. Yet, Ukraine's strong digital governance and still-developing electricity market offer a chance to design flexible frameworks from the ground up. With targeted pilot testing and adaptive legislation, Ukraine could position itself as a regional pioneer in community-level decentralized energy trading.

MATLAB illustrations of automated market mechanisms. Although smart contracts run on decentralized ledgers, their economic logic can be modeled and tested in MATLAB. The platform enables simulation of P2P trading, dynamic pricing, energy allocation, and automated settlement, which are the main components of decentralized markets. This section provides conceptual MATLAB examples showing how trading rules can be executed automatically, replicating the logic of on-chain transactions without focusing on blockchain syntax.

An M-code example of automatic energy-matching process, showing how trades and payments would be triggered, is shown in Fig. 1. Another simple example (Fig. 2) involves a smart contract that verifies whether a prosumer has generated sufficient renewable energy to fulfill a trade and then triggers payment automatically. This script emulates a 24-hour operation where a MATLAB "smart contract" executes payments automatically when generation exceeds demand. In a blockchain system, such logic would be implemented in Solidity or another smart contract language, but the control flow is conceptually identical.

```

Prosumers_num = 36; prosumers = ["1"];
for pr = 2:Prosumers_num
    prosumers(pr) = num2str(pr);
end
energy_produced = round(10*rand(1, Prosumers_num),2); % kWh
energy_needed = round(7.5*rand(1, Prosumers_num),2); % kWh
net_energy = energy_produced - energy_needed; % Determine transferable energy
price_per_kWh = 0.18; % USD/kWh; ---> Smart-contract-like logic: auto-match sellers/buyers
buyers = find(net_energy < 0); sellers = find(net_energy > 0); deal_num = 0; deal = [];
for i = sellers
    for j = buyers
        traded = min(net_energy(i), abs(net_energy(j)));
        if traded > 0
            payment = traded * price_per_kWh;
            fprintf("Prosumer %s sells %.2f kWh to %s for $%.6f\n", prosumers(i), traded, prosumers(j), payment);
            deal_num = deal_num + 1;
            deal(deal_num,:) = [prosumers(i), traded, prosumers(j), payment];
            net_energy(i) = net_energy(i) - traded; net_energy(j) = net_energy(j) + traded;
        end
    end
end
end

```

Fig. 1. Simple energy trading settlement simulation

```

G = 5 + randn(1,24); % hourly generation profile
D = 4 + randn(1,24); % hourly demand profile
G(G<0) = 0; D(D<0) = 0; % physical non-negativity
% Contract parameters
price_per_kWh = 0.12;
threshold = 0.5; % minimum energy surplus for trade (kWh)
% Smart-contract-like logic
payment = zeros(1,24);
for t = 1:24
    if G(t) - D(t) >= threshold
        energy_sold = G(t) - D(t);
        payment(t) = energy_sold * price_per_kWh;
    end
end
end

```

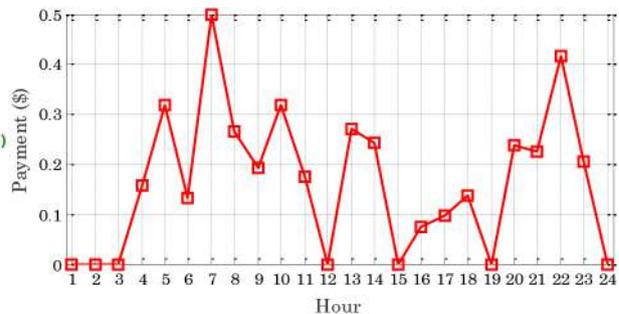


Fig. 2. Automated energy settlement between prosumer and consumer

Another key mechanism in decentralized markets is real-time price adjustment according to the difference between supply and demand. The example in Fig. 3 uses a simple proportional controller to adjust energy prices dynamically. Here, the smart contract autonomously adjusts price to balance the market by (1). A positive imbalance (where demand exceeds supply) increases the price, while an oversupply reduces it. This mechanism corresponds to algorithmic clearing implemented in projects such as Power Ledger or Sunchain.

Smart contracts in decentralized energy communities can manage internal allocation of energy tokens. MATLAB's optimization tools can simulate this through constrained minimization problem (2) whose example is shown in Fig. 4. The optimization simulates a smart contract allocating energy among participants to minimize the total cost while fulfilling local demands. The result matrix $[x_{ij}]_{M \times N}$ corresponds to automated token flows between producers and consumers.

A decentralized market may also employ bidding auctions, where each participant submits a bid automatically. Smart contracts then select winning bids transparently. The M-code algorithm in Fig. 5 replicates a smart-contract auction that transparently allocates energy based on bids. The process is deterministic and verifiable, having key features of on-chain energy auctions.

```

time = 1:48;
supply = 50 + 10*sin(0.2*time);
demand = 55 + 15*cos(0.2*time);

% price adjustment rate
alpha = 0.0002;

p = zeros(1,48);
% initial price ($/kWh)
p(1) = 0.10;

for t = 1:length(time)-1
    p(t+1) = p(t) + alpha*(demand(t) - supply(t));
end

```

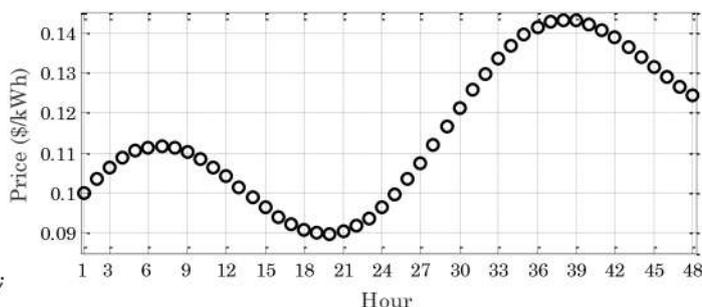


Fig. 3. Dynamic pricing based on supply-demand imbalance

```

nGen = 13; nCons = 16;
G = randi(15, 1, nGen)+4; % generation capacities (kWh)
D = randi(15, 1, nCons)+4; % demands (kWh)
cost = rand(1, nGen)/10+0.05; % generation costs ($/kWh)
price = rand(1, nCons)/10+0.05; % local willingness to pay ($/kWh)
options = optimoptions(@fmincon, 'MaxIter', 4325, 'TolFun', 1e-10, 'MaxFunEvals', 5000, 'Display', 'none');
A = zeros(nGen+nCons, nGen*nCons);
for nn = 1:nGen
    for mm = 1:nCons
        A(nn, nGen*(mm-1)+1:nGen*mm) = [zeros(1,nn-1), 1, zeros(1,nGen-nn)];
        A(nGen+mm, nGen*(mm-1)+1:nGen*mm) = -ones(1,nGen);
    end
end
B = [G -D];
lb=zeros(nGen,nCons); ub = 1000*ones(nGen,nCons);
f = @(X) ( sum(sum((cost'*ones(1,nCons) - ones(nGen,1)*price).*X) ) );
[X_star, fval, exitflag, output, lambda, grad, hessian] = fmincon(f, ones(nGen,nCons), ...
A, B, [], [], lb, ub, [], options);
disp('Optimal Energy Flow Matrix (kWh):'); disp(X_star);

```

Fig. 4. Community-level token exchange optimization

```

bidders = 10;
offers = 0.08 + 0.04*rand(1,bidders); % offers in $/kWh
energy_available = 100; % total energy (kWh)
bid_qty = 10 + 20*rand(1,bidders);

% Sort bids (ascending price)
[sorted_offers, idx] = sort(offers);
sorted_qty = bid_qty(idx);

allocated = zeros(1,bidders);
remaining = energy_available;
for i = 1:bidders
    if remaining >= sorted_qty(i)
        allocated(i) = sorted_qty(i);
        remaining = remaining - sorted_qty(i);
    else
        allocated(i) = remaining; break;
    end
end

```

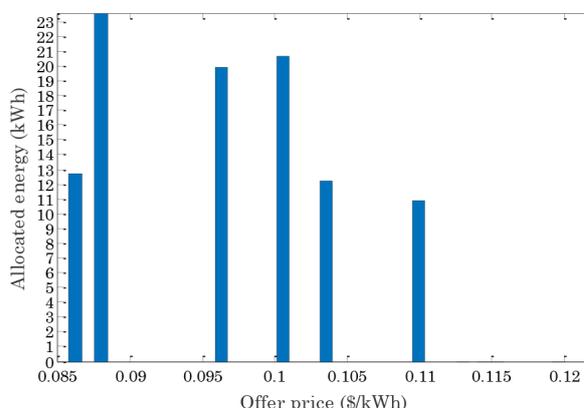


Fig. 5. Blockchain-inspired auction mechanism

In fact, MATLAB does not replace blockchain functionality but serves as a pre-blockchain testbed simulation environment where algorithms for pricing, settlement, and allocation can be verified before implementation in actual smart contract code. Researchers and engineers can use MATLAB to:

1. Validate economic consistency of automated market mechanisms.
2. Optimize parameter tuning (e. g., price sensitivity α).
3. Simulate grid balance and peer interactions before deployment.

Such pre-testing is particularly valuable for contexts like Ukraine, where pilot blockchain projects can first be evaluated in simulation mode to ensure regulatory compliance and technical feasibility before live rollout.

Conclusions. Smart contracts are becoming a key tool in building decentralized energy markets. They automate transactions, ensure transparency, and cut costs, reshaping how electricity is traded and managed. However, their adoption depends on solving technical and regulatory challenges, addressing which must take into account the following findings:

1. Automation and transparency are major strengths, enabling instant P2P trading and verified renewable tracking.
2. Feasibility is proven by pilot projects in Australia, the USA, and Europe, which show local energy autonomy in action.

-
3. Scalability and data security remain weak points; better consensus, APIs, and oracles are needed.
 4. Regulatory gaps limit progress, though sandbox trials offer a workable bridge.
 5. Ukraine can benefit from its digital governance systems to run pilot projects in microgrids and universities.

The strategic recommendations to these findings are:

1. Regulate – legally recognize blockchain contracts and protect consumers.
2. Standardize – align with international norms for interoperability.
3. Experiment – use sandboxes for academic and cooperative tokenized trading.
4. Train – build skills among engineers, lawyers, and regulators.
5. Integrate AI and IoT – link smart contracts with predictive and automated energy tools.

Future research should combine blockchain, AI, and edge computing for real-time energy optimization, where key priorities are:

1. Modeling game-theoretic market behavior under smart contract rules.
2. Creating formal verification tools for contract safety, possibly in MATLAB.
3. Measuring environmental impact to ensure that blockchain supports decarbonization.

In summary, the evolution of decentralized energy markets through smart contracts is not merely a technological innovation but a systemic transformation of energy governance. If guided by transparent regulation, robust engineering, and social responsibility, smart contracts are going to become the backbone of a resilient, democratic, and sustainable energy economy – for Ukraine and globally.

Bibliography:

1. Tushar W., Saha T. K., Yuen C., Smith D., Poor H. V. Peer-to-peer trading in electricity networks: An overview. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020, vol. 11, no. 4, pp. 3185–3200.
2. Parag Y., Sovacool B. Electricity market design for the prosumer era. *Nature Energy*. 2016, no. 1, Art. no. 16032.
3. Zhang C., Wu J., Zhou Y., Cheng M., Long C. Peer-to-peer energy trading in a microgrid. *Applied Energy*. 2018, vol. 220, pp. 1–12.
4. Morstyn T., Farrell N., Darby S. J., McCulloch M. D. Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants. *Nature Energy*. 2018, no. 3, pp. 94–101.
5. Van Looy A. Blockchain Technology. In: *From Emerging Technologies to Business Opportunities*, pp. 121–145. Springer, Cham, 2024.
6. Christidis K., Devetsikiotis M. Blockchains and smart contracts for the Internet of Things. *IEEE Access*. 2016, vol. 4, pp. 2292–2303.
7. Merinova S. V., Romanuke V. V. Perspectives of blockchain technology in business and management: advantages and challenges. *Systems and Technologies*. 2025, vol. 69, no. 1, pp. 138–144.
8. Andoni M., Robu V., Flynn D., Abram S., Geach D., Jenkins D., McCallum P., Peacock A. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019, vol. 100, pp. 143–174.
9. Tushar W., Yuen C., Saha T. K., Morstyn T., Chapman A. C., Alam M. J. E., Hanif S., Poor H. V. Peer-to-peer energy systems for connected communities: A review of recent advances and emerging challenges. *Applied Energy*. 2021, vol. 282, Part A, Art. no. 116131.
10. Saberi S., Kouhizadeh M., Sarkis J., Shen L. Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*. 2018, vol. 57, iss. 7, pp. 2117–2135.
11. Kang J., Yu R., Huang X., Maharjan S., Zhang Y., Hossain E. Enabling localized peer-to-peer electricity trading among plug-in hybrid electric vehicles using consortium blockchains. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2017, vol. 13, no. 6, pp. 3154–3164.
12. Esmat A., de Vos M., Ghiassi-Farokhfal Y., Palensky P., Epema D. A novel decentralized platform for peer-to-peer energy trading market with blockchain technology. *Applied Energy*. 2021, vol. 282, Part A, Art. no. 116123.
13. Taherdoost H., Madanchian M. Blockchain-based new business models: A systematic review. *Electronics*. 2023, vol. 12, iss. 6, Art. no. 1479.
14. Zhuo S., Wu W., Zhou Y., Cao R., Bian J. Research on Comprehensive Blockchain Regulation and Anti-fraud System. In: Chen J., Wen B., Chen T. (eds.). *Blockchain and Trustworthy Systems. BlockSys 2023. Communications in Computer and Information Science*, vol. 1896, pp. 133–146. Springer, Singapore, 2024.
15. Abrar I., Sheikh J. A. Current trends of blockchain technology: architecture, applications, challenges, and opportunities. *Discover Internet of Things*. 2024, no. 4, Art. no. 7.
16. Zavytii O. Use of smart contracts in the energy market of Ukraine. *Economic analysis*. 2023, vol. 33, no. 2, pp. 247–257.
17. Ministry of Energy of Ukraine. *Energy Strategy*. Kyiv, Ukraine, 2022. Available: <https://mev.gov.ua/en/reforma/energy-strategy>
18. Sioshansi F. P. *Distributed Generation and Its Implications for the Utility Industry*. Academic Press, 2014.

-
19. Mengelkamp E., Gärtner J., Rock K., Kessler S., Orsini L., Weinhardt C. Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid. *Applied Energy*. 2018, vol. 210, pp. 870–880.
 20. Goranović A., Meisel M., Fotiadis L., Wilker S., Treytl A., Sauter T. Blockchain applications in microgrids: An overview of current projects and concepts. In: *IECON 2017 – 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, China, 2017, pp. 6153–6158.
 21. Romanuke V. V., Dementiev S. Y., Yaremko S. A. An IoT-based system of mechanizing sport competition motion for perception improvement. In: *Proceedings of the 5th Edge Computing Workshop (doors 2025)*, 4 April 2025, Zhytomyr, Ukraine, 2025, CEUR Workshop Proceedings, vol. 3943, pp. 81–96.
 22. Singh G. Blockchain-Based Smart Contracts: Technical and Usage Aspects. In: Kaushik K., Sharma I. (eds.). *Next-Generation Cybersecurity. Blockchain Technologies*, pp. 99–115. Springer, Singapore, 2024.
 23. Zheng Z., Xie S., Dai H.-N., Chen X., Wang H. Blockchain challenges and opportunities: A survey. *International Journal of Web and Grid Services*. 2018, vol. 14, Art. no. 352.
 24. Kouhizadeh M., Sarkis J. Blockchain practices, potentials, and perspectives in greening supply chains. *Sustainability*. 2018, vol. 10, iss. 10, Art. no. 3652.
 25. Siano P., De Marco G., Rolán A., Loia V. A survey and evaluation of the potentials of distributed ledger technology for peer-to-peer transactive energy exchanges in local energy markets. *IEEE Systems Journal*. 2019, vol. 13, no. 3, pp. 3454–3466.
 26. Knirsch F., Unterweger A., Engel D. Privacy-preserving blockchain-based electric vehicle charging with dynamic tariff decisions. *Computer Science – Research and Development*. 2018, vol. 33, pp. 71–79.
 27. Pop C., Cioara T., Antal M., Anghel I., Salomie I., Bertoncini M. Blockchain based decentralized management of demand response programs in smart energy grids. *Sensors*. 2018, vol. 18, iss. 1, Art. no. 162.
 28. Kirlı D., Couraud B., Robu V., Salgado Bravo M., Norbu S., Andoni M., Antonopoulos I., Negrete-Pincetic M., Flynn D., Kiprakis A. Smart contracts in energy systems: A systematic review of fundamental approaches and implementations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022, vol. 158, Art. no. 112013.
 29. Eurelectric. *Blockchain in Electricity: a Critical Review of Progress to Date*. Brussels, Belgium, 2025. Available: https://www.eurelectric.org/wp-content/uploads/2024/06/paper1_blockchain_eurelectric.pdf
 30. Werbach K., Cornell N. Contracts Ex Machina. *Duke Law Journal*. 2017, vol. 67, pp. 313–382.
 31. Finck M. *Blockchain and the General Data Protection Regulation: Can distributed ledgers be squared with European data protection law?* Brussels, Belgium, European Parliamentary Research Service, 2019. Available: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2019/634445/EPRS_STU\(2019\)634445_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2019/634445/EPRS_STU(2019)634445_EN.pdf)
 32. Reno S., Haque M. M. Utilizing Off-Chain Storage Protocol for Solving the Trilemma Issue of Blockchain. In: Dutta P., Bhattacharya A., Dutta S., Lai W. C. (eds.). *Emerging Technologies in Data Mining and Information Security. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1348, pp. 169–179. Springer, Singapore, 2023.
 33. Zimba A., Phiri K. O., Mulenga M., George M. A systematic literature review of blockchain technology and energy efficiency based on consensus mechanisms, architectural innovations, and sustainable solutions. *Discover Analytics*. 2025, vol. 3, Art. no. 14.
 34. *Powerledger Lightpaper 2023*. Zug, Switzerland. <https://powerledger.io/company/power-ledger-whitepaper/>
 35. Pazaitis A., De Filippi P., Kostakis V. Blockchain and value systems in the sharing economy: The illustrative case of Backfeed. *Technological Forecasting and Social Change*. 2017, vol. 125, pp. 105–115.
 36. Sousa T., Soares T., Pinson P., Moret F., Baroche T., Sorin E. Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019, vol. 104, pp. 367–378.
 37. Gorbachuk V., Bardadym T., Dunaievskiy M., Godliuk V., Rybachok D. Fundamentals of decentralized electricity markets. In: *Usage of Blockchain Technologies in Energetics – 2025*, 26 March 2025, Kyiv, Ukraine, 2025, pp. 15–18.
 38. The Ministry of Digital Transformation and the Ukrainian Startup Fund have launched the Sandbox project for AI and blockchain startups. Available: <https://dia.dp.gov.ua/en/the-ministry-of-digital-transformation-and-the-ukrainian-startup-fund-have-launched-the-sandbox-project-for-ai-and-blockchain-startups/>

References:

1. Tushar, W., Saha, T. K., Yuen, C., Smith, D., Poor, H. V. (2020). Peer-to-peer trading in electricity networks: An overview. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11 (4), pp. 3185–3200.
2. Parag, Y., Sovacool, B. (2016). Electricity market design for the prosumer era. *Nature Energy*, 1, Art. no. 16032.
3. Zhang, C., Wu J., Zhou, Y., Cheng, M., Long, C. (2018). Peer-to-peer energy trading in a microgrid. *Applied Energy*, 220, pp. 1–12.
4. Morstyn, T., Farrell, N., Darby, S. J., McCulloch, M. D. (2018). Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants. *Nature Energy*, 3, pp. 94–101.
5. Van Looy, A. (2024). Blockchain Technology. In: *From Emerging Technologies to Business Opportunities*, pp. 121–145. Springer, Cham.

-
6. Christidis, K., Devetsikiotis, M. (2016). Blockchains and smart contracts for the Internet of Things. *IEEE Access.*, 4, pp. 2292–2303.
 7. Merinova, S. V., Romanuke, V. V. (2025). Perspectives of blockchain technology in business and management: advantages and challenges. *Systems and Technologies*, 69 (1), pp. 138–144.
 8. Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P., Peacock, A. (2019). Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100, pp. 143–174.
 9. Tushar, W., Yuen, C., Saha, T. K., Morstyn, T., Chapman, A. C., Alam, M. J. E., Hanif, S., Poor, H. V. (2021). Peer-to-peer energy systems for connected communities: A review of recent advances and emerging challenges. *Applied Energy*, 282, Part A, Art. no. 116131.
 10. Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., Shen, L. (2018). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57 (7), pp. 2117–2135.
 11. Kang, J., Yu, R., Huang, X., Maharjan, S., Zhang, Y., Hossain, E. (2017). Enabling localized peer-to-peer electricity trading among plug-in hybrid electric vehicles using consortium blockchains. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13 (6), pp. 3154–3164.
 12. Esmat, A., de Vos, M., Ghiassi-Farrokhfal, Y., Palensky, P., Epema, D. (2021). A novel decentralized platform for peer-to-peer energy trading market with blockchain technology. *Applied Energy*, 282, Part A, Art. no. 116123.
 13. Taherdoost, H., Madanchian, M. (2023). Blockchain-based new business models: A systematic review. *Electronics*, 12 (6), Art. no. 1479.
 14. Zhuo, S., Wu, W., Zhou, Y., Cao, R., Bian, J. (2024). Research on Comprehensive Blockchain Regulation and Anti-fraud System. In: Chen J., Wen B., Chen T. (eds.). *Blockchain and Trustworthy Systems. BlockSys 2023. Communications in Computer and Information Science*, vol. 1896, pp. 133–146. Springer, Singapore.
 15. Abrar, I., Sheikh, J. A. (2024). Current trends of blockchain technology: architecture, applications, challenges, and opportunities. *Discover Internet of Things*, 4, Art. no. 7.
 16. Zavytii, O. (2023). Use of smart contracts in the energy market of Ukraine. *Economic analysis*, 33 (2), pp. 247–257.
 17. Ministry of Energy of Ukraine. *Energy Strategy*. Kyiv, Ukraine, 2022. Available: <https://mev.gov.ua/en/reforma/energy-strategy>
 18. Sioshansi, F. P. (2014). *Distributed Generation and Its Implications for the Utility Industry*. Academic Press.
 19. Mengelkamp, E., Gärtner, J., Rock, K., Kessler, S., Orsini, L., Weinhardt, C. (2018). Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid. *Applied Energy*, 210, pp. 870–880.
 20. Goranović, A., Meisel, M., Fotiadis, L., Wilker, S., Treytl, A., Sauter, T. (2017). Blockchain applications in microgrids: An overview of current projects and concepts. In: *IECON 2017 – 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, China, pp. 6153–6158.
 21. Romanuke, V. V., Dementiev, S. Y., Yaremko, S. A. (2025). An IoT-based system of mechanizing sport competition motion for perception improvement. In: *Proceedings of the 5th Edge Computing Workshop (doors 2025)*, 4 April 2025, Zhytomyr, Ukraine, CEUR Workshop Proceedings, vol. 3943, pp. 81–96.
 22. Singh, G. (2024). Blockchain-Based Smart Contracts: Technical and Usage Aspects. In: Kaushik K., Sharma I. (eds.). *Next-Generation Cybersecurity. Blockchain Technologies*, pp. 99–115. Springer, Singapore.
 23. Zheng, Z., Xie, S., Dai, H.-N., Chen, X., Wang, H. (2018). Blockchain challenges and opportunities: A survey. *International Journal of Web and Grid Services*, 14, Art. no. 352.
 24. Kouhizadeh, M., Sarkis, J. (2018). Blockchain practices, potentials, and perspectives in greening supply chains. *Sustainability*, 10 (10), Art. no. 3652.
 25. Siano, P., De Marco, G., Rolán, A., Loia, V. (2019). A survey and evaluation of the potentials of distributed ledger technology for peer-to-peer transactive energy exchanges in local energy markets. *IEEE Systems Journal*, 13 (3), pp. 3454–3466.
 26. Knirsch, F., Unterweger, A., Engel, D. (2018). Privacy-preserving blockchain-based electric vehicle charging with dynamic tariff decisions. *Computer Science – Research and Development*, 33, pp. 71–79.
 27. Pop, C., Cioara, T., Antal, M., Anghel, I., Salomie, I., Bertoncini, M. (2018). Blockchain based decentralized management of demand response programs in smart energy grids. *Sensors*, 18 (1), Art. no. 162.
 28. Kirli, D., Couraud, B., Robu, V., Salgado Bravo, M., Norbu, S., Andoni, M., Antonopoulos, I., Negrete-Pincetic, M., Flynn, D., Kiprakis, A. (2022). Smart contracts in energy systems: A systematic review of fundamental approaches and implementations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, Art. no. 112013.
 29. Eurelectric. *Blockchain in Electricity: a Critical Review of Progress to Date*. Brussels, Belgium, 2025. Retrieved from: https://www.eurelectric.org/wp-content/uploads/2024/06/paper1_blockchain_eurelectric.pdf
 30. Werbach, K., Cornell, N. (2017). Contracts Ex Machina. *Duke Law Journal*, 67, pp. 313–382.
-

-
31. Finck, M. (2019). *Blockchain and the General Data Protection Regulation: Can distributed ledgers be squared with European data protection law?* Brussels, Belgium, European Parliamentary Research Service, Retrieved from: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2019/634445/EPRS_STU\(2019\)634445_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2019/634445/EPRS_STU(2019)634445_EN.pdf)
32. Reno, S., Haque, M. M. (2023). Utilizing Off-Chain Storage Protocol for Solving the Trilemma Issue of Blockchain. In: Dutta P., Bhattacharya A., Dutta S., Lai W. C. (eds.). *Emerging Technologies in Data Mining and Information Security. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1348, pp. 169–179. Springer, Singapore.
33. Zimba, A., Phiri, K. O., Mulenga, M., George, M. (2025). A systematic literature review of blockchain technology and energy efficiency based on consensus mechanisms, architectural innovations, and sustainable solutions. *Discover Analytics*, 3, Art. no. 14.
34. *Powerledger Lightpaper 2023*. Zug, Switzerland. Retrieved from: <https://powerledger.io/company/powerledger-whitepaper/>
35. Pazaitis, A., De Filippi, P., Kostakis, V. (2017). Blockchain and value systems in the sharing economy: The illustrative case of Backfeed. *Technological Forecasting and Social Change*, 125, pp. 105–115.
36. Sousa, T., Soares, T., Pinson, P., Moret, F., Baroche, T., Sorin, E. (2019). Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, pp. 367–378.
37. Gorbachuk, V., Bardadym, T., Dunaievskiy, M., Godliuk, V., Rybachok, D. (2025). Fundamentals of decentralized electricity markets. In: *Usage of Blockchain Technologies in Energetics – 2025*, 26 March 2025, Kyiv, Ukraine, pp. 15–18.
38. The Ministry of Digital Transformation and the Ukrainian Startup Fund have launched the Sandbox project for AI and blockchain startups. Retrieved from: <https://dia.dp.gov.ua/en/the-ministry-of-digital-transformation-and-the-ukrainian-startup-fund-have-launched-the-sandbox-project-for-ai-and-blockchain-startups/>

Дата першого надходження статті до видання: 18.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

Ульяновська Ю. В., кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного
забезпечення Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-5945-5251

Рудянова Т. М., кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного
забезпечення Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-2750-6031

Чуванько М. С., здобувач вищої освіти
ORCID: 0009-0003-7213-0146

ОСНОВНІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ МОБІЛЬНОГО ДОДАТКУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОСТАВОК ТА ВИКОНАННЯ ВНУТРІШНІХ ЗАВДАНЬ З УРАХУВАННЯМ РОЛЕЙ

У статті розглянуто підходи до цифровізації внутрішніх бізнес-процесів ритейлу та оптимізації управління персоналом шляхом створення мобільного застосунку з багаторівневою системою доступу. Мета роботи – дослідження, проєктування та реалізація архітектури мобільного додатку, що забезпечує диференційований доступ для працівників, адміністраторів та менеджерів відповідно до їхніх ролей та функціональних обов'язків. Проведено аналіз сучасних систем управління завданнями та сформувано вимоги до розробки рішення, орієнтованого на стандартизоване виконання внутрішніх операцій у торгівельній мережі. Розроблений застосунок забезпечує централізоване формування, призначення, контроль та виконання завдань, а також підтримує внутрішню комунікацію між рівнями персоналу. Для кожної групи користувачів створено окремий UI/UX-інтерфейс, що підвищує ефективність взаємодії із системою. Програмну реалізацію побудовано з використанням технологій C# та Blazor Server, що дозволило сформувати єдину кодову базу для мобільного та веб-функціоналу. Зберігання та обробка даних здійснюється в Microsoft SQL Server Express, що забезпечує масштабованість та надійність інформаційних процесів.

Наукова новизна полягає у поєднанні принципів ієрархічної підпорядкованості персоналу з механізмами розмежування доступу (ACL) у мобільному середовищі. Запропоноване рішення підвищує операційну ефективність торгівельних мереж, оптимізує внутрішні робочі процеси та може бути адаптоване для різних організацій.

Ключові слова: мобільний застосунок, Blazor Server, C#, SQL Server Express, розмежування доступу, полі користувачів, управління персоналом.

Ulyanovska Yu. V., Rudyanova T. M., Chuvanko M. S. Core aspects of developing a mobile application for supply chain optimization and role-based management of internal tasks

The article examines approaches to the digitalization of internal business processes in retail and to the optimization of personnel management through the development of a mobile application with a multi-level access system. The aim of the study is to design and implement an architecture for a mobile application that provides differentiated access for employees, administrators, and managers according to their roles and functional responsibilities. The paper analyzes modern task management solutions and defines requirements for developing a system intended to standardize and streamline internal operations within a retail network.

The developed application enables centralized task creation, assignment, monitoring, and execution, as well as internal communication between personnel levels. Separate UI/UX interfaces have been designed for each user group to improve interaction efficiency. The software implementation is based on C# and Blazor Server technologies, which made it possible to create a unified codebase for both mobile and web functionality. Data storage and processing are performed using Microsoft SQL Server Express, ensuring system scalability and information reliability.

The scientific novelty lies in integrating hierarchical personnel subordination principles with access control mechanisms (ACL) in a mobile environment. The proposed solution enhances the operational efficiency of retail networks, optimizes internal workflows, and can be adapted for various organizational structures.

Key words: mobil application, Blazor Server, C#, SQL Server Express, access control, user roles, personnel management.



Постановка проблеми. Сучасна мережева роздрібна торгівля (рітейл) характеризується високою динамікою операційних процесів та географічною розподіленістю об'єктів (магазинів). Для підтримки ефективності системи критично важливим є безперерйне та уніфіковане виконання всіх внутрішніх функцій, які охоплюють мерчандайзинг, інвентаризацію, контроль якості обслуговування, обслуговування обладнання та навчання персоналу. Імплементация цифрових рішень є фактором системної ефективності для комплексних організаційних структур, особливо у роздрібній торгівлі, де асинхронна комунікація та утримання контролю за виконанням залишаються ключовими викликами. Компанії, які адаптують програмні засоби для раціоналізації операцій, здобувають значні переваги в процесній дисципліні, мінімізації затрат часу на рутинні операції та підвищенні продуктивності праці.

Забезпечення координації між адміністраторами, керівниками магазинів і працівниками залу – це щоденне завдання, яке потребує швидкості, чіткості та злагодженості. З огляду на це, постає завдання створення універсального цифрового інструменту, який дозволив би ефективно ставити, розподіляти та відстежувати виконання внутрішніх завдань у межах організаційної структури компанії. Важливим аспектом такого рішення є урахування ролей користувачів: кожна категорія співробітників має мати доступ лише до необхідної інформації та функцій згідно зі своїми посадовими обов'язками.

Актуальність теми зумовлена не лише практичними потребами торгової компанії, але й загальною тенденцією до цифровізації робочих процесів у сфері торгівлі. Розробка спеціалізованих застосунків для внутрішнього користування дозволяє не просто підвищити продуктивність, а й створити конкурентну перевагу завдяки чіткій організації персоналу та злагодженій роботі. Саме тому запропоноване рішення відповідає вимогам часу та має значний потенціал для ефективного розширення та впровадження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведено комплексний та всебічний аналіз предметної області, що є критично важливим для успішної розробки цільового програмного продукту. Зроблено аналіз сучасних досліджень, присвячених світовим тенденціям стратегій розвитку підприємств у галузі роздрібно-ї торгівлі: розглянути основні тенденції ідентифікації підприємств сфери рітейлу серед конкурентів [1]. В умовах сучасної динамічної економіки, де швидкість прийняття рішень та якість обслуговування клієнтів є ключовими, ефективна внутрішня комунікація стає невід'ємною частиною бізнес-стратегії. В умовах цифрової трансформації бізнесу роздрібна торгівля змушена інвестувати у формування нової ІТ-інфраструктури та електронних платформ [2]. У роботі [3] проаналізовано передовий досвід впровадження інновацій у рітейлі, ідентифіковано передумови його застосування в Україні, а також виявлено чинники, що стримують розвиток галузі, та окреслено прогнозовані зміни. На теоретичному рівні сутність та призначення корпоративних комунікацій детально розкрито через призму механізмів управління [4]. Значна увага приділялася методологічним підходам до оцінки ефективності комунікаційних каналів та трансформації управлінських орієнтирів під впливом цифрових технологій [5].

Необхідно відмітити що у вирішенні задач прийняття рішень та якості обслуговування клієнтів можуть бути застосовані такі структури даних як черги та черги пріоритетів. Черга пріоритетів – це модифікована версія черги, у якій зі списку віддаляється елемент із вищим пріоритетом. Елементи в черзі пріоритетів розглядаються як пари джерело-значення, у якій ключ визначає рівень пріоритету. Пріоритет оцінюється по деякому зовнішньому критерію. При видаленні із черги пріоритетів елементів з однаковим пріоритетом спочатку віддаляється елемент, що надійшов раніше. Також чергу пріоритетів можна представити у вигляді декількох черг, де кожна черга використовується для свого пріоритету (див. рис. 1):

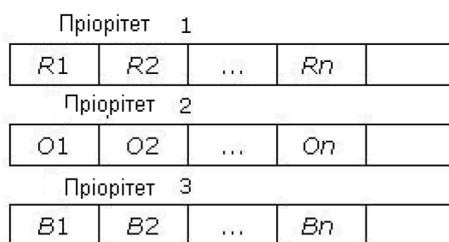


Рис. 1. Чергу пріоритетів можна представити у вигляді декількох черг

Елементи другої черги обслуговуються тільки тоді, коли перша черга порожня. Черги пріоритетів можуть використовуватись в системах, що записує процеси в список і потім виконує їх у порядку пріоритетів.

Системи управління робочими завданнями (Task Management Systems, TMS) – це програмні продукти, що дозволяють організувати процес планування, делегування, моніторингу та аналізу виконання робочих задач у межах компанії [6]. Вони належать до класу корпоративних інформаційних систем і можуть бути як частиною більш комплексних ERP/CRM рішень, так і окремими самостійними програмами. Популярні системи, такі як Trello, Asana, Jira чи Bitrix24, безумовно, мають широкий функціонал і можуть бути використані в різних сферах, однак у випадку великих роздрібних компаній вони часто виявляються надмірно

складними, занадто узагальненими або такими, що не враховують специфіку внутрішніх процесів саме в офлайн-роздрібі.

Доцільним є застосування мережевого планування. Для ефективної реалізації проекту розробляється графік виконання робіт. Розробка графіка проекту передбачає контроль часових параметрів з огляду на технологічну залежність між завданнями. Несвочасне завершення одного етапу безпосередньо впливає на старт наступних, що потребує ретельного управління послідовністю. Порядок планування виконання робіт є таким:

- 1) Визначення усіх компонентів (робіт) проекту, їх послідовності та тривалості.
- 2) Представлення проекту у вигляді мережевої моделі (графіка) для наочного відображення залежностей.
- 3) Розрахунок критичного шляху на базі побудованого мережевого графіка.
- 4) Формування підсумкового часового графіка реалізації.

Встановлення правильних залежностей для будь-якої роботи, яка додається до мережевої моделі, вимагає однозначних відповідей на наступні запитання:

1. Яке завдання є безпосереднім попередником поточного?
2. Яке завдання є безпосереднім наступником поточного?
3. Яке завдання може виконуватися паралельно (одночасно) з поточним?

В умовах зростаючої цифровізації підприємств, стрімкого збільшення обсягу даних та посилення кіберзагроз, питання безпечного та контрольованого доступу до інформаційних ресурсів набуває особливої актуальності. Управління доступом (Access Control) є одним з найважливіших аспектів інформаційної безпеки [7]. Механізм гарантує, що лише ідентифіковані та автентифіковані користувачі мають можливість звертатися до певних ресурсів та виконувати призначені їм дії. Одним із найпоширеніших, найефективніших та найбільш гнучких підходів до організації прав доступу є рольова модель доступу (Role-Based Access Control, RBAC), що забезпечує не лише високий рівень безпеки, а й значно спрощує управління доступом у масштабних корпоративних системах.

Незважаючи на значну кількість досліджень у сфері корпоративних комунікацій та наявності універсальних task-менеджерів, недостатньо уваги приділено розробці спеціалізованих мобільних інформаційних систем, архітектура яких була б цілеспрямовано оптимізована під багаторівневу рольову структуру та оперативні потреби персоналу роздрібною мережі в українських реаліях. Існуючі рішення або створюють інформаційне перевантаження через надмірний функціонал, або не забезпечують належного рівня контролю та прозорості виконання завдань, прив'язаних до конкретної торгової точки та ролі. Саме ця прогалина обґрунтовує необхідність розробки та наукового обґрунтування основних аспектів запропонованого мобільного застосунку.

Дослідження, присвячені засобам реалізації мобільних додатків, підкреслюють актуальність модернізації технологій розробки та необхідність обґрунтованого вибору інструментарію [8]. У роботі [8] було проведено порівняльний аналіз нативної та кросплатформної розробок, де автори аргументують ефективність їх симбіозу як універсального підходу для масштабних проектів, що не вимагають високої продуктивності (наприклад, навчальні додатки). Результати дослідження містять оптимальний алгоритм відбору засобів створення мобільних додатків, що є цінним для формування рекомендацій щодо якісного вибору сучасних технологій.

Мета дослідження. Метою дослідження є автоматизація постановки, делегування та контролю виконання завдань в межах торгової мережі з урахуванням функціональних ролей користувачів. Мобільний застосунок має включати кілька рівнів доступу: для рядових працівників (отримання та виконання задач), для адміністраторів (контроль та підтвердження виконання), а також для керівників (створення, редагування та розподіл завдань між магазинами). Такий підхід дозволяє уникнути дублювання функціональності, підвищити безпеку доступу до інформації та спростити користування додатком.

Існуючі рішення є або надто універсальними (і тому потребують суттєвого налаштування та адаптації), або є надто складними в користуванні для рядових працівників. Тому розробка власного мобільного застосунку дозволяє точково закрити потреби конкретної мережі супермаркетів, не перевантажуючи систему зайвими функціями.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання: проаналізувати існуючі програмні рішення для керування задачами в корпоративному середовищі, зокрема в торговельних мережах; розглянути мобільні бізнес-застосунки – їхні типи, переваги й недоліки у контексті внутрішнього документообігу та комунікації, оцінити переваги їх застосування для інтерактивних бізнес-рішень; розробити архітектуру застосунку з урахуванням багаторівневої моделі доступу (ролі користувачів), спроектувати і реалізувати базу даних на основі SQL Server Express для забезпечення надійне зберігання та обробки завдань, статусів, ролей; сформулювати задачі автоматизації процесу керування завданнями, визначити методи їх реалізації та забезпечити відповідність інтерфейсу UX-принципам для корпоративного середовища; створити прототип застосунку з повним набором функцій; протестувати застосунок у тестовому середовищі, перевіривши коректність авторизації, логіки бізнес-процесів, збереження та оновлення даних, а також відповідність функціональним вимогам.

Виклад основного матеріалу. Виходячи з методології системного проектування та порівняльного аналізу існуючих рішень, архітектуру застосунку було концептуально сформовано на базі технологічного

стеку.NET. Це рішення забезпечує логічну цілісність та відповідає ключовим нефункціональним вимогам проекту: швидкість розробки, безпека та масштабованість, що критично важливо для операційної специфіки роздрібною мережі. Вибір C# як основної мови гарантує високу продуктивність та надійність бекенд-частини (бізнес-логіки) для роботи з великою кількістю користувачів. Платформа.NET надає вбудовані механізми безпеки (строга типізація, ASP.NET Core Identity для рольової авторизації) та багату екосистему бібліотек (NuGet, Entity Framework Core), що прискорює розробку та спрощує інтеграцію з корпоративними сервісами. Підтримка від Microsoft гарантує постійний розвиток та гнучкість.

Для створення користувацького інтерфейсу обрано архітектуру Blazor Server. Це рішення уніфікує процес розробки, дозволяючи використовувати єдину мову C# як для бекенду, так і для інтерактивного фронтенду, що скорочує час розробки та спрощує обслуговування коду. Модель серверного рендерингу через SignalR забезпечує високу продуктивність на клієнті та швидкий початковий запуск, що є критичним для пристроїв із обмеженими ресурсами, які використовуються працівниками магазинів. Blazor Server також підтримує реалізацію системи доступу на основі ролей (RBAC) та має потенціал для розгортання як PWA. Для забезпечення централізованого управління даними та відповідності архітектурним вимогам, у якості основи для сховища даних (Data Repository) була обрана SQL Server Express. Цей вибір є оптимальним для етапів розробки та пілотного впровадження завдяки економічній доцільності (повна безкоштовність) та безшовній інтеграції з обраним стеком.NET через Entity Framework Core (ORM). Хоча SQL Server Express є зменшеною версією і має обмеження (зокрема, обсяг бази даних 10 ГБ та обмеження системних ресурсів), її базовий функціонал (транзакції, індексація) та надійність є достатніми для реалізації MVP. Обмеження щодо розширених функцій (наприклад, SQL Server Agent) не є критичними для цілей даного застосунку.

На основі функціональних вимог була спроектована реляційна модель даних (РМД), що забезпечує цілісність та прозорість оперативних процесів. Ключові об'єкти РМД включають наступні елементи:

- Users та Roles: реалізують модель RBAC (керівник, адміністратор, працівник) та забезпечують просторове розмежування доступу через зв'язок зі Stores;
- Stores: містить ідентифікаційні дані географічно розгалуженої структури мережі;
- Tasks: центральна сутність, що фіксує всі деталі завдання (Title, Deadline, Status), що має зовнішні ключі до Users (для відстеження відповідальності) та Stores (для прив'язки до торгової точки);
- Comments та News: об'єкти для забезпечення прозорості комунікації та централізованого інформування персоналу.

Обґрунтований вибір та структуризація даних є логічно узгодженими з технологічним стеком, з одночасним забезпеченням надійного сховища та оптимізованої обробки інформації, а також можливість безшовної міграції на повноцінній версії SQL Server для подальшого масштабування.

Для ефективної реалізації мобільного застосунку, що відповідає функціональним та нефункціональним вимогам роздрібною мережі, обрано трирівневу архітектуру (3-Tier Architecture), адаптовану для інтерактивних веб-додатків. Цей підхід забезпечує чіткий розподіл відповідальності між компонентами, підвищуючи гнучкість, масштабованість та зручність підтримки системи. Виходячи з обґрунтованого технологічного стеку (C#, Blazor Server, SQL Server Express), застосунок логічно розділено на три основні рівні (Таблиця 1).

Таблиця 1

Трирівнева архітектура застосунку

Рівень	Основне призначення	Ключові технології
Рівень представлення	Взаємодія з користувачем (UI/UX)	Blazor Server, SignalR (тонкий клієнт)
Рівень бізнес-логіки	Обробка даних, реалізація бізнес-правил та управління доступом	ASP.NET Core, C# Business Services, DAL/EF Core
Рівень даних	Постійне зберігання, доступ та управління даними	SQL Server Express

На основі цієї трирівневої концепції було створено схематичне зображення архітектури додатку, яке відображає основні взаємодії між його компонентами (див. рис. 2).

Для створення цієї приблизної візуальної частини інтерфейсу мобільного додатку використовувався штучний інтелект (див. рис. 3).

Метою було відобразити можливий дизайн та основні екрани застосунку для різних ролей користувачів (адміністратора, менеджера, працівника), а також ключові функціональні елементи, такі як керування завданнями, перегляд новин та особистий кабінет.

Реалізація інтерфейсу користувача (UI) у Blazor Server базується на використанні C# та Razor-синтаксису, забезпечуючи динамічні та інтерактивні веб-сторінки. Ключовим архітектурним рішенням є забезпечення рольової моделі доступу (RBAC), інтегрованої через ASP.NET Core Identity, яка визначає видимість елементів UI та функціональних можливостей залежно від ролі користувача (адміністратор, менеджер, працівник). Це підвищує безпеку даних та оптимізує зручність використання (usability), мінімізуючи інформаційне перевантаження.

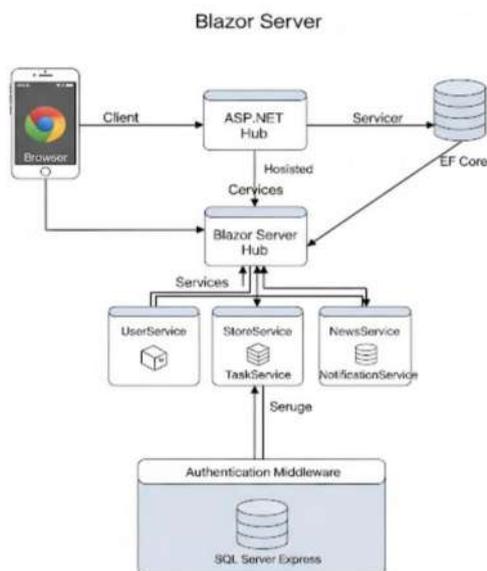


Рис. 2. Схематична візуалізація архітектури додатку



Рис. 3. Візуалізація додатку за допомогою ШІ

Принципи проектування UI включає наступні елементи:

- Адміністратор (Admin): має повний доступ до всіх службових функцій, включаючи управління користувачами (призначення ролей, прив'язка до магазинів) та управління торговими точками. Інтерфейс надає розширені інструменти для моніторингу та публікації новин.

- Менеджер (Manager): фокус на операційному управлінні завданнями у своїй зоні відповідальності. Функціонал включає постановку завдань для підлеглих, моніторинг виконання та перегляд новин.

- Працівник (Worker): має мінімальний рівень доступу, орієнтований на виконання призначених завдань (з можливістю зміни статусу) та перегляд загальнокорпоративних новин. Інтерфейс максимально простий та інтуїтивно зрозумілий.

- Технічна реалізація RBAC на рівні UI забезпечується компонентами `AuthorizeView` та атрибутом `[Authorize]` в Blazor, що дозволяє умовно рендерити вміст сторінок та навігаційних елементів залежно від ролей поточного користувача. Дизайн є адаптивним (responsive) для коректного відображення на мобільних пристроях.

Модуль завдань є ключовим функціональним компонентом системи, що забезпечує централізоване управління всіма операційними та адміністративними задачами в мережі. Його архітектура складається з клієнтської частини (Blazor Components для створення форм та відображення списків) та серверної частини (C# `TaskService` для валідації, обробки та збереження даних). Функціонал створення завдань доступний для ролей «Адміністратор» та «Менеджер». Сервісна логіка (`TaskService`) відповідає за взаємодію з базою даних та ініціювання сповіщень.

Для надійного зберігання та ефективного доступу до даних обрано Microsoft SQL Server Express із використанням Entity Framework Core (EF Core) як ORM. Це забезпечує високу сумісність та спрощує розробку через об'єктно-реляційне відображення. Схема бази даних (Database Schema) розроблена для підтримки RBAC та оперативних процесів і включає наступні ключові об'єкти:

- AspNetUsers/AspNetRoles: стандартні таблиці ASP.NET Core Identity для управління користувачами, паролями та ролями (Admin, Manager, Worker), а також додаткове поле StoreId для прив'язки користувача до конкретного магазину.
 - Stores: зберігає ідентифікаційні дані торгових точок.
 - Tasks: центральна сутність із полями Title, Description, Deadline, Status, та зовнішніми ключами для прив'язки до Users (AssignedToUserId, CreatedByUserId) та Stores.
 - Comments та News: об'єкти для забезпечення прозорості комунікації та централізованого інформування.
 - TaskAttachments: для зберігання метаданих про прикріплені файли до завдань.
- Концептуальна ER-діаграма наведено на рис. 4.

```

erDiagram
    AspNetUsers ||--o{ AspNetUserRoles : "has"
    AspNetRoles ||--o{ AspNetUserRoles : "has"

    Stores ||--o{ AspnetUsers : "manages"
    Stores ||--o{ Tasks : "assigned_to"

    AspNetUsers ||--o{ Tasks : "creates"
    AspNetUsers ||--o{ Tasks : "assigned_to"
    AspNetUsers ||--o{ Comments : "posts"
    AspNetUsers ||--o{ News : "publishes"

    Tasks ||--o{ Comments : "has"
    Tasks ||--o{ TaskAttachments : "has"

```

Рис. 4. Концептуальна ER-діаграма

Використання Entity Framework Core (EF Core) для взаємодії з базою даних включає наступні аспекти:

- Entity Framework Core є потужним об'єктно-реляційним відображенням (ORM) для платформи .NET, який дозволяє розробникам взаємодіяти з реляційними базами даних, використовуючи об'єкти C# (сутісні моделі) та LINQ (Language Integrated Query) замість прямого написання SQL-запитів. Це значно прискорює розробку, підвищує читабельність коду та мінімізує ризики, пов'язані з SQL-ін'єкціями.

- ApplicationDbContext – це ключовий клас EF Core, який представляє сесію взаємодії з базою даних. Він успадковується від IdentityDbContext (для інтеграції з ASP.NET Core Identity) і містить властивості DbSet<TEntity> для кожної таблиці в базі даних.

Правильно спроектована база даних та ефективна логіка обробки даних за допомогою Entity Framework Core є фундаментом для стабільної та надійної роботи застосунку. Обрана реляційна модель дозволяє ефективно зберігати та керувати складними взаємозв'язками між користувачами, магазинами та завданнями. Використання EF Core спрощує розробку та дозволяє зосередитися на бізнес-логіці, мінімізуючи потребу в ручному написанні SQL-запитів, при цьому забезпечуючи цілісність та узгодженість даних у системі.

Елементи комп'ютерної графіки інтегруються на етапі проектування інтерфейсу (UI/UX) та при реалізації модуля аналітики для підвищення зручності використання (usability) та ефективності сприйняття інформації.

На етапі проектування (UI/UX Design) комп'ютерна графіка використовується як засіб моделювання та візуалізації майбутнього застосунку, зокрема мржна виділити такі кроки розробки:

- прототипування (Prototyping): створення детальних статичних та інтерактивних макетів екранів (wireframes, mockups) за допомогою графічного редактора Figma, що дозволяє верифікувати юзабіліті та адаптивний дизайн до початку кодування;

- створення графічних активів: розробка векторних зображень (іконок, логотипів) та растрових зображень магазинів, аватарів користувачів, що відповідають корпоративному стилю та забезпечують концептуальну цілісність візуального оформлення;

- візуалізація даних: комп'ютерна графіка інтегрується безпосередньо у функціонал для ефективного відображення операційних даних, а аналітичні панелі (Dashboards) з використанням 2D-графіки за допомогою діаграм, графіків дозволяють, наприклад, відображати прогрес виконання завдань за статусами, розподіл навантаження між магазинами чи співробітниками, візуалізувати ключові показники ефективності (KPI). Це забезпечує швидкий аналіз великих обсягів даних для керівників та адміністраторів;

- картографічне макетування: інтеграції географічних карт є корисною для візуалізації розташування магазинів мережі та прив'язки завдань до конкретних торгових точок, що є критичним для роздрібною мережі.

При завантаженні програми відкривається «Домашня сторінка». На ній є розділ авторизації, який слугує входом до будь-якої ролі користувача (див. рис. 5).

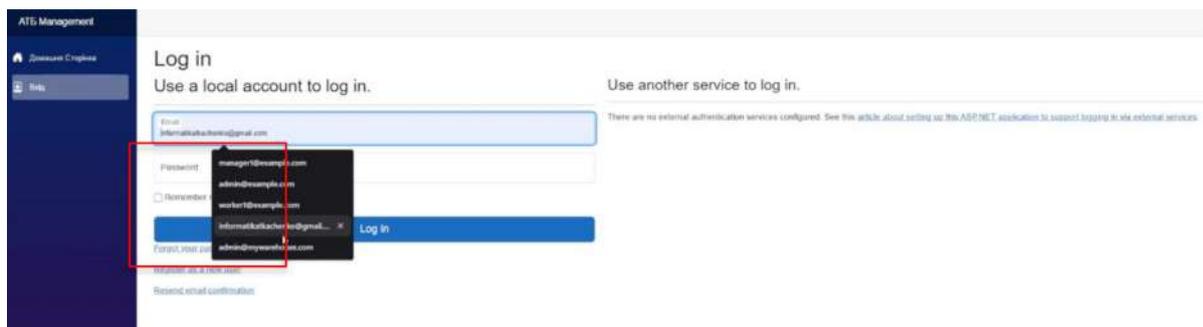


Рис. 5. Домашня сторінка додатку

Після введення e-mail та паролю користувач потрапляє на головне вікно сторінки адміністратора (рис. 6), де розташовано 6 різних вкладок.

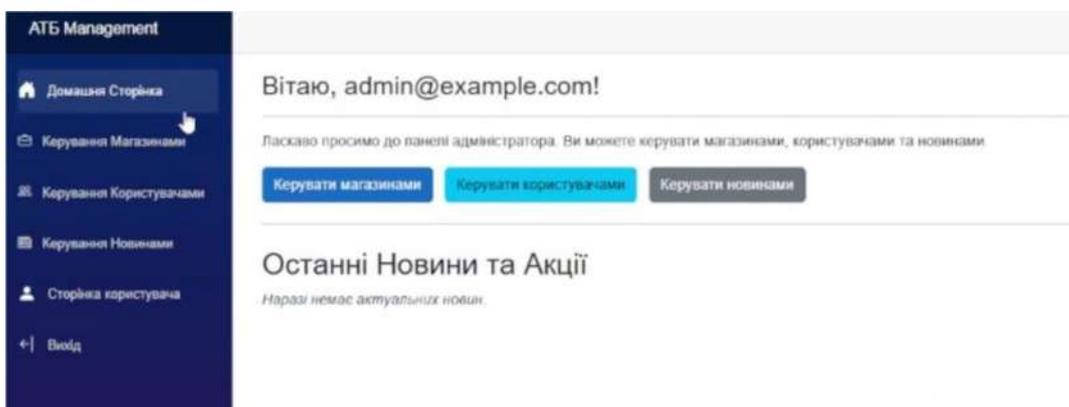


Рис. 6. Домашня сторінка ролі «Адміністратор»

Перша вкладка – «Керування магазинами». Адміністратор має право на додавання, редагування, видалення магазинів мережі (рис. 7). При неправильному введенні інформації буде впливати вікно помилки.



Рис. 7. Вкладка «Керування магазинами»

Вкладка «Керування користувачами», яка дає адміністратору доступ до додавання користувача, надання йому ролі, в якому магазині користувач буде працювати. А також, адміністратор має право редагувати вже існуючих користувачів (див. рис. 8, 9).

Вкладка «Керування новинами» дає доступ до створення новин для підлеглих. Це більше пов'язано з загальною, важливою інформацією, яку потрібно донести до всіх користувачів одразу (див. рис. 10).

В залежності від ролі (адміністратор, менеджер, працівник) – буде змінюватися доступ, інтерфейс і права для користувача.

Тестування функціональності застосунку – комплексний процес, що включає модульне, інтеграційне, функціональне, безпекове та продуктивне тестування. Деталізовано стратегію тестування, використані

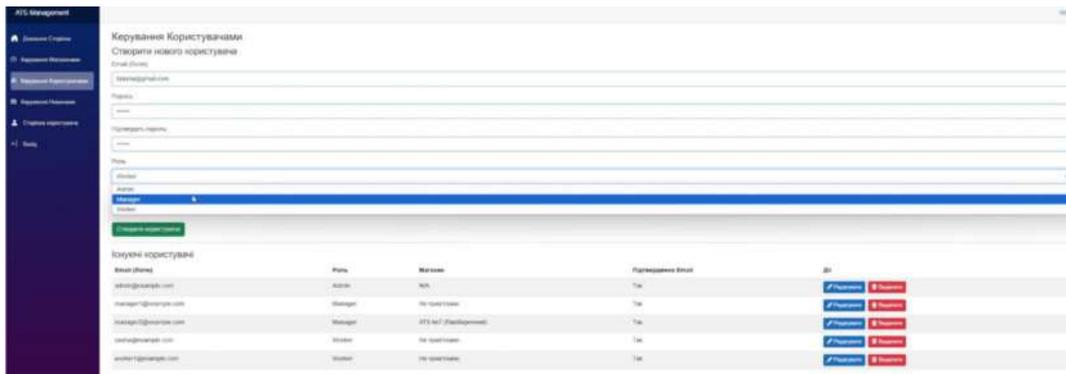


Рис. 8. Вкладка «Керування користувачами»

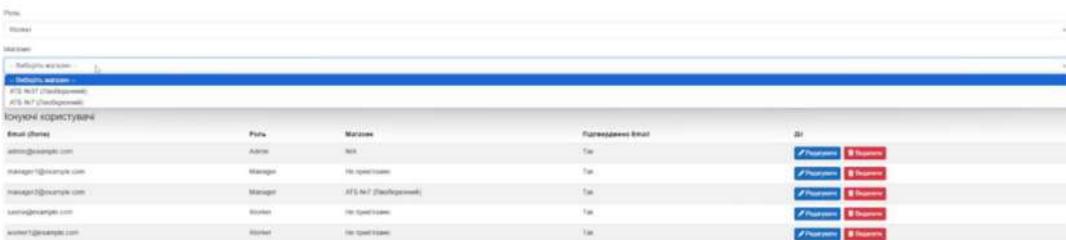


Рис. 9. Вкладка «Керування користувачами»

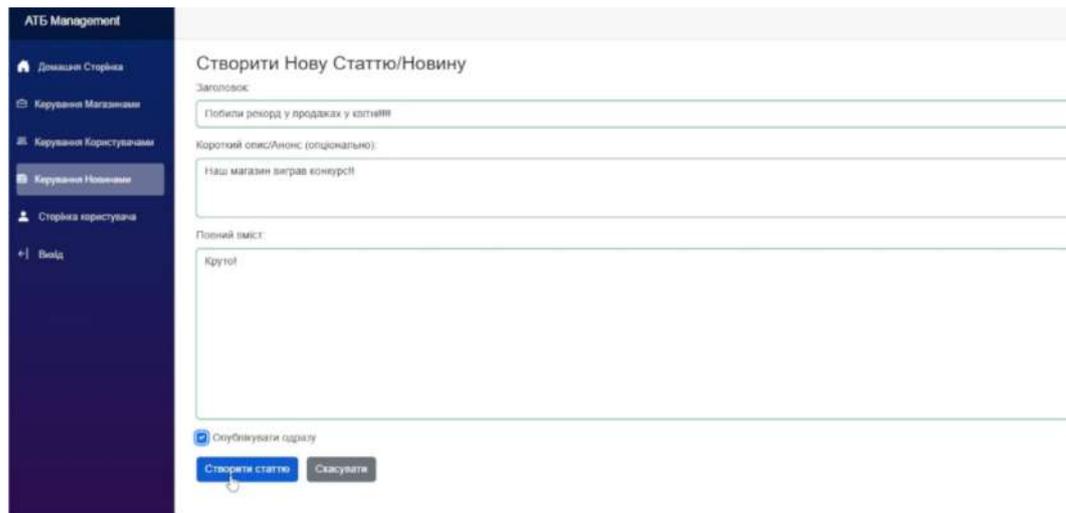


Рис. 10. Вкладка «Керування новинами»

інструменти (xUnit, Moq, Playwright) та розроблені тестові сценарії. Наголошено на важливості виявлення та виправлення дефектів для забезпечення високої якості програмного продукту.

Висновки. В науковій роботі було розроблено мінімально життєздатний продукт (MVP) – мобільний застосунок для управління завданнями та внутрішніми комунікаціями в роздрібній торговельній мережі. Результати дослідження:

- обґрунтовано актуальність розробки спеціалізованого TMS для офлайн- роздрібу та визначено, що існуючі універсальні платформи не враховують усіх потреб багатотисячної регіонально розподіленої структури;
- обрано та обґрунтовано технологічний стек (.NET/C#, Blazor Server, SQL Server Express), який забезпечує високу швидкість розробки, логічну цілісність коду та відповідає вимогам безпеки і масштабованості корпоративних рішень;
- спроектовано трирівневу архітектуру, що включає рольову модель доступу (RBAC) на базі ASP.NET Core Identity для забезпечення диференційованого доступу користувачів;
- реалізовано ключовий функціонал MVP: управління користувачами, магазинами, створення, делегування та моніторинг завдань, а також модуль інформування (новини);

–розроблено реляційну модель даних на основі SQL Server Express, логічно узгоджену з бізнес-процесами.

Розроблений програмний продукт має прикладне значення і є відповіддю на реальний запит бізнесу в умовах цифрової трансформації. Його впровадження забезпечує техніко-економічний ефект через скорочення часу на комунікацію та зменшення помилок у виконанні завдань, підвищення загальної ефективності операційного управління магазинами, наявність потенціалу для масштабування на всю мережу.

Впровадження комп'ютерної графіки на етапі UI/UX та в аналітичних модулях є методологічно виправданим, що забезпечує значне підвищення операційної продуктивності системи та забезпечує інтуїтивність взаємодії для всіх категорій користувачів.

Для трансформації MVP у повноцінну платформу операційного менеджменту запропоновано такі напрямки вдосконалення (Табл. 2):

Таблиця 2

Напрямки вдосконалення проєкту

Напрямок	Запропоноване вдосконалення
Функціональне розширення	Впровадження push-сповіщень, розширення офлайн-режиму (Blazor WebAssembly), додавання чек-листів для декомпозиції складних завдань та інтеграція модуля навчання/інструктажів
Аналітика та контроль	Розробка розширеного модуля звітів для аналізу продуктивності (середній час виконання, ефективність магазинів) з візуалізацією даних
Технічна оптимізація	Покращення UX/UI та оптимізація продуктивності для високомасштабних корпоративних впроваджень

Впровадження цих удосконалень дозволить підвищити продуктивність системи та перетворити її на потужний інструмент операційного менеджменту в роздрібній торгівлі.

Список використаних джерел:

1. Толпежніков Р. О., Толпежнікова Т. Г., Шишман Д. В. Світові тенденції та особливості розробки стратегії розвитку підприємств сфери ритейлу. *Ефективна економіка*. 2021. № 6. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=8965>
2. Кучанський О. В. Сучасний стан роздрібно́ї торгівлі в Україні: орієнтир для удосконалення управлінського обліку. *Економіка та суспільство*. Випуск № 62 / 2024.
3. Гальків Л. І., Демчишин М. Я., Гришук Д. В. Інноваційний імператив розвитку ритейлу як деактиватор ризиків і загроз соціально-економічній безпеці. *«Львівська політехніка»*. Серія: «Проблеми економіки та управління». Випуск 3, Номер 847(4), 2016, С. 61–68
4. Економічні детермінанти та конкурентні стратегії розвитку сучасних бізнес-структур : моногр. / за заг. ред. д-ра екон. наук, проф. Т. Гринько. Дніпро : Видавець Біла К. О., 2024. 424 с.
5. Гудзь О. Є., Маковецька І. М. Управління комунікаціями в підприємствах: монографія / О. Є. Гудзь, І. М. Маковецька. Львів : «Галицька видавнича спілка», 2021. 216 с.
6. Brett Day. Best Task Management Software of 2025. Forbs. URL: https://www.forbes.com/advisor/business/software/best-task-management-software/#asana_section
7. Управління доступом. Платформа для розгортання та супроводу державних електронних реєстрів. URL: <https://ddm-architecture-cluster-mgmt.apps.krrt-stage.ncr.gov.ua/ua/platform/1.9.8/arch/architecture/security/access-control.html>
8. Ічанська Н. В., Улько С. І. Основні аспекти створення мобільних додатків та вибір інструментів їх розробки. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2020, випуск 1(59). С. 74–78. URL: <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/1786>

References:

1. Tolpezhnikov, R. O., Tolpezhnikova, T. H., & Shyshman, D. V. (2021). Svitovi tendentsii ta osoblyvosti rozrobky stratehii rozvytku pidpriemstv sfery riteilu [Global trends and features of developing enterprise development strategies in the retail sphere]. *Efektivna ekonomika*, (6). Retrieved from: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=8965>
2. Kuchanskyi, O. V. (2024). Suchasnyi stan rozdribnoi torhivli v Ukraini: oriientyr dlia udoskonalennia upravlinskoho obliku [The current state of retail trade in Ukraine: A guide for improving management accounting]. *Ekonomika ta suspilstvo*, (62).
3. Halkiv, L. I., Demchyshyn, M. Ya., & Hryshchuk, D. V. (2016). Innovatsiinyi imperatyv rozvytku riteilu yak deaktyvator ryzykiv i zahroz sotsialno-ekonomichnii bezpetsi [The innovative imperative of retail development as a deactivator of risks and threats to socio-economic security]. *Lvivska politekhnikha. Serii: Problemy ekonomiky ta upravlinnia*, 3(847(4)), 61–68.

4. Hrynko, T. (Ed.). (2024). Ekonomichni determinanty ta konkurentni stratehii rozvytku suchasnykh biznes-struktur [Economic determinants and competitive strategies for the development of modern business structures]. Dnipro: Vydavets Bila K. O.

5. Hudz, O. Ye., & Makovetska, I. M. (2021). Upravlinnia komunikatsiiami v pidpriemstvakh [Communication management in enterprises]. Lviv: Halytska vydavnycha spilka.

5. Day, B. (2025). *Best task management software of 2025*. *Forbes*. Retrieved from: https://www.forbes.com/advisor/business/software/best-task-management-software/#asana_section

6. Upravlinnia dostupom. Platforma dlia rozghortannia ta suprovodu derzhavnykh elektronnykh reiestriv [Access management. Platform for deployment and maintenance of state electronic registries]. (n.d.). Retrieved from: <https://ddm-architecture-cluster-mgmt.apps.krrt-stage.ncr.gov.ua/ua/platform/1.9.8/arch/architecture/security/access-control.html>

7. Ichanska, N. V., & Ulko, S. I. (2020). Osnovni aspekty stvorennia mobilnykh dodatkov ta vybir instrumentiv yikh rozrobky [Main aspects of mobile application development and tool selection]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, 1(59), 74–78. Retrieved from: <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/1786>

Дата першого надходження статті до видання: 20.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

Shyshkanova G. A., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mathematics
National University Zaporizhzhia Polytechnic
ORCID: 0000-0002-0336-2803

Zaytseva T. A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Technologies, Oles Honchar Dnipro National University
ORCID: 0000-0002-6346-3390

Zhyr S. I., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Technologies and International Logistics, University of Customs and Finance
ORCID: 0009-0006-2410-6792

Korotunova O. V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mathematics
National University Zaporizhzhia Polytechnic
ORCID: 0000-0002-0883-5550

INTELLECTUAL DECISIONS TO COMPRESSIVE SENSING FOR EFFICIENT DATA ACQUISITION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

This paper considers the application of linear algebra methods to Compressive Sensing technology for wireless sensor networks (WSNs) specialized in temperature monitoring in “smart” greenhouses. It is shown that the traditional approach, which involves the transmission of full data streams from each individual sensor, leads to high energy consumption and generates information redundancy, which is a problematic factor for autonomous battery-powered systems. As an alternative, a special architecture of compressive sensing is proposed, within which not the original data are transmitted, but their compressed linear combinations. This radically reduces traffic, but, thanks to mathematical transformations, retains the possibility of full and accurate restoration of the entire temperature field on the receiver side.

The methodological basis is the use of the fundamental property of sparsity of temperature signals when they are presented in certain bases, in particular, the basis of the discrete cosine transform. Modern optimization and iterative linear-algebraic algorithms are used to reconstruct the original data from compressive sensing. The practical effectiveness is illustrated by a model example of a network with six sensors, where compressing sensing allowed to reduce the amount of transmitted information by 50 % and simultaneously detect anomalies in the operation of a faulty sensor, confirming the stability of the system.

The proposed architecture provides comprehensive energy efficiency, reliability and scalability of the monitoring system, supports the dynamic addition of new sensors and can be successfully integrated into modern Internet of Things systems, industrial complexes and «smart» cities. Thus, the work clearly demonstrates the powerful synergy between mathematical rigor and practical efficiency of compressing sensing for creating intelligent agricultural systems of the next generation.

Key words: modeling, optimization methods, wireless sensor networks, compressing sensing, linear algebra, intellectual system, Internet of Things; data compression and reconstruction.

Шишканова Г. А., Зайцева Т. А., Жир С. І., Коротунуова О. В. Інтелектуальні рішення щодо компресійних вимірювань для ефективного збору даних у бездротових сенсорних мережах

У даній роботі розглянуто застосування методів лінійної алгебри в технологію компресійних вимірювань (Compressive Sensing) для бездротових сенсорних мереж, спеціалізованих на моніторингу температури в «розумних» теплицях. Показано, що традиційний підхід, що передбачає передачу повних потоків даних від кожного окремого датчика, призводить до високого енергоспоживання та генерує інформаційну надмірність, що є проблемним фактором для автономних систем із батарейним живленням. Як альтернатива запропонована спеціальна архітектура компре-



сійного вимірювання, в рамках якої передаються не початкові дані, а їх стислі лінійні комбінації. Це радикально скорочує трафік, але, завдяки математичним перетворенням, зберігає можливість повноцінного та точного відновлення всього температурного поля на стороні приймача.

Методологічну основу становить використання фундаментальної властивості розрідженості температурних сигналів при їх поданні в певних базисах, зокрема, базисі дискретного косинусного перетворення. Для реконструкції вихідних даних із стиснених вимірів застосовано сучасні оптимізаційні та ітераційні лінійно-алгебраїчні алгоритми. Практичну ефективність ілюструє модельний приклад мережі з шістьма датчиками, де компресійне вимірювання дозволило зменшити обсяг переданої інформації на 50 % і одночасно виявити аномалії в роботі несправного сенсора, підтвердивши стійкість системи.

Запропонована архітектура забезпечує комплексну енергоефективність, надійність та масштабованість системи моніторингу, підтримує динамічне додавання нових сенсорів та може бути успішно інтегрована в сучасні системи Інтернету речей, промислові комплекси та «розумні» міста. Таким чином, робота наочно демонструє потужну синергію між математичною строгістю та практичною ефективністю компресійного вимірювання для створення інтелектуальних аграрних систем нового покоління.

Ключові слова: моделювання, оптимізаційні методи, бездротові сенсорні мережі, компресійне вимірювання, лінійна алгебра, інтелектуальна система, Інтернет речей; стиснення та реконструкція даних.

Problem Statement. Modern wireless sensor networks (WSNs) are increasingly used for automated monitoring and control in agricultural systems, in particular in “smart” greenhouses, where it is necessary to constantly monitor temperature, humidity and lighting to ensure optimal plant growth conditions. However, with an increase in the number of sensors, problems of data redundancy and high energy consumption arise, especially in cases where sensors are powered by batteries and most of the energy is spent on information transmission. The traditional approach with constant transmission of complete measurements does not meet the requirements of energy efficiency and reliability, which creates a need for new mathematical and algorithmic solutions. One of the promising areas is compressing sensing (CS), which is based on linear algebra methods and sparse signal representation. It allows you to reduce the amount of transmitted information without losing the accuracy of temperature field reconstruction, as well as detect anomalies in the operation of individual sensors. Thus, the problem arises of developing and researching a linear-algebraic CS model for WSNs, which will provide energy-efficient, reliable, and intelligent monitoring in greenhouses and will become the basis for creating modern agricultural Internet of Things systems.

Analysis of recent research and publications. WSNs are ideal platforms for automatic control in various areas, including modern agriculture. For example, greenhouses require constant monitoring of conditions (temperature, humidity, lighting) for optimal yield and efficient resource management. However, with increasing sensor density, problems arise: high power consumption (especially for communication) and data redundancy [1]. These limitations are especially critical for battery-powered WSNs, where communication usually accounts for a large part of the total energy consumption. Therefore, reducing the amount of transmitted data without compromising measurement accuracy has become a key research goal in the development of energy-efficient smart greenhouse systems.

A good solution is CS, whose powerful mathematical basis allows reconstructing high-dimensional data (e.g., a temperature field) from a small number of linear measurements [2]. This is possible by exploiting the sparsity or compressibility of signals. From a linear algebra perspective, CS models data acquisition as an uncertain system of equations, where the reconstruction of the full field is performed through a sparse reconstruction problem, which is usually solved using optimization or iterative linear algebraic methods. For example, optimization methods for finding the most sparse representation of a signal (basis search or basis pursuit) [3]; an iterative algorithm that selects the best basis vectors for approximating the signal (orthogonal greedy pursuit or orthogonal selection method) [4, 5]; and methods for solving the problem of Lasse regression or sparse encoding through thresholding (iterative compression-threshold algorithm) [6]. The listed methods fundamentally rely on vector and matrix operations, emphasizing the central role of linear algebra in both theory and implementation.

A review of recent publications shows [1, 7] that WSN is one of the most promising and practically significant areas of CS application, especially in scenarios characterized by limited energy resources and high data redundancy.

Research purpose of the paper is to theoretically substantiate and demonstrate the effectiveness of CS as an alternative to the traditional approach to data transmission in WSNs for environmental monitoring.

The research aims to identify practical advantages of the proposed architecture, such as reducing the amount of transmitted information, extending battery life, and increasing system reliability by detecting anomalies in sensor operation.

Within the framework of the set goal, it is envisaged to use sparse signal processing methods and linear algebraic optimization algorithms that allow to restore the full temperature field from a minimum number of measurements, while maintaining the possibility of diagnosing the state of the network itself. In addition, methods of computer modeling of the sensor network are used to quantitatively assess the achieved level of compression and reconstruction accuracy.

Basic material presentation. The temperature inside the greenhouse is monitored using a grid of sensor locations in space and at discrete points in time. Let us introduce the following notations: N is the number of sensor locations (spatial nodes); T is the number of time points that we consider (time snapshots); the vector $x \in R^N$ is the

complete space-time temperature field (one snapshot).

The objective of this study is to reduce the number of transmitted samples while reconstructing x (or a sequence $\{x^{(t)}\}$) with acceptable accuracy.

Consider a linear compression measurement model. The sensors transmit scalar values to a fusion center, which forms linear combinations, which can be expressed in the following formulas:

$$y = \Phi x + e, y \in R^M, \Phi \in R^{M \times N}, M \ll N, \quad (1)$$

with y are CS, Φ is the sensing (measurement) matrix implemented by the network, and e denotes measurement noise.

CS assumes x is (approximately) sparse in some basis $\Psi \in R^{N \times N}$: there exists $s \in R^N$ with few nonzeros such that

$$x = \Psi s, \quad \|s\|_0 = k \ll N. \quad (2)$$

For temperature fields, good choices sparsifying basis Ψ include discrete cosine transform (DCT) [8] or low-order spatial eigenvectors (PCA) because temperature varies smoothly and has dominant low-frequency components – i.e., s is compressible (rapidly decaying coefficients).

Hence, the measurement equation becomes

$$y = As + e, \quad A := \Phi\Psi, \quad (4)$$

with $A \in R^{M \times N}$. A successful recovery typically requires matrix A has the restricted isometry property (RIP) or low mutual coherence between columns. Informally, A should preserve lengths of sparse vectors [9, 10].

Next follows the recovery procedure of s from underdetermined linear system using sparsity priors.

Reconstruction of a sparse signal in CS can be formulated directly in terms of linear algebra and convex optimization. A standard approach is basis pursuit, in which the unknown sparse coefficient vector $s \in R^N$ is estimated by solving the convex program

$$\hat{s} = \arg \min_s \|s\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \|y - As\|_2 \leq \varepsilon. \quad (5)$$

Once the sparse representation \hat{s} is recovered, the original signal can be reconstructed

$$\hat{x} = \Psi \hat{s}. \quad (6)$$

In scenarios where measurement noise must be explicitly accounted for, the reconstruction is often posed as a LASSO-type problem [11],

$$\hat{s} = \arg \min_s \left(\frac{1}{2} \|y - As\|_2^2 + \lambda \|s\|_1 \right), \quad (7)$$

which balances measurement fidelity with sparsity through the regularization parameter λ .

A computationally appealing alternative, especially for energy-limited wireless sensor networks, is the greedy algorithm Orthogonal Matching Pursuit (OMP) [4], iterative correlation and least squares on selected columns. Here the procedure begins with residual $r_0 = y$ and an empty set of selected indices $S = \emptyset$. At each iteration, the algorithm identifies the column of A most correlated with the current residual by selecting

$$i_t = \arg \max_j \left| \langle a_j, r_{t-1} \rangle \right|, \quad (8)$$

where a_j denotes the j -th column of the sensing matrix. The selected index is added to the support set, $S \leftarrow S \cup \{i_t\}$, and the coefficients associated with the chosen columns are updated by solving the least-squares problem

$$s_s = \arg \min_z \|y - A_s z\|_2, \quad (9)$$

where s_s is a partial vector containing only the coefficients on the currently selected support set S ; z is the temporary vector we optimize to compute the best values of s_s ; A_s is the submatrix of A containing only the columns indexed by S . When the Gram matrix $A_s^T A_s$ is invertible, this step has the closed-form linear-algebraic solution

$$s_s = \left(A_s^T A_s \right)^{-1} A_s^T y. \quad (10)$$

The residual is then updated according to

$$r_t = y - A_s s_s \quad (11)$$

and the procedure continues until the residual norm is sufficiently small or the desired sparsity level is reached. Because OMP uses only inner products and small least-squares solves, it is highly suitable for lightweight fusion centers in sensor networks.

When temperature fields exhibit correlations not only in space but also in time, CS can be extended to a

spatio-temporal model. Spatio-temporal models often use separable bases to exploit both spatial and temporal correlations:

$$\Psi = \Psi_s \otimes \Psi_t, \quad (12)$$

where Ψ_s and Ψ_t are spatial and temporal bases, respectively; \otimes denotes the Kronecker product [12].

Suppose T consecutive temperature fields are stacked into a matrix $X \in R^{N \times T}$. If the data admit a separable sparse or low-rank structure, they can be approximated as

$$X \approx \Psi_s S \Psi_t^T. \quad (13)$$

In vectorized form, this becomes

$$\text{vec}(X) \approx (\Psi \otimes \Psi_t) \text{vec}(S), \quad (14)$$

This structure naturally leads to Kronecker-factored sensing operators of the form

$$\Phi = \Phi_t \otimes \Phi_s, \quad (15)$$

which drastically reduce the number of degrees of freedom and computational cost [12]. Such separable models are particularly advantageous in greenhouse monitoring, where temperature fields evolve smoothly over both dimensions.

Let us consider a specific simplified case, due to the need for conciseness. Let us rewrite formula (1) in a simplified form, neglecting noise:

$$y = \Phi x, \quad (16)$$

We have $N = 6$ temperature sensors located in a greenhouse. The readings of all 6 sensors at a certain point in time form a signal x :

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T = [22, 23, 22.5, 60, 21, 22]^T \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (17)$$

The temperature in the greenhouse should be more or less uniform, but in this example there is the following observation: sensor #4 is broken and shows an absurd 60 °C. This means that in the natural basis our signal is not sparse. But if we imagine that the real signal is a uniform temperature + one fault, then in another basis (for example, in the difference basis or in the frequency domain) it will be sparse.

Let us assume that our signal x is sparse in the DCT basis [3]. This means that it can be represented with only a few significant coefficients according to formula (2), where Ψ is the 6x6 DCT basis matrix, x is the sparse vector of DCT coefficients. Most of the elements of s are zero or close to zero. For simplicity, let us take the standard DCT matrix [8]. Its elements are defined as:

$$\Psi_{k,n} = \cos \frac{\pi k \cdot (2n + 1)}{2N}, \quad (18)$$

approximately, up to normalization:

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0.41 & 0.41 & 0.41 & 0.41 & 0.41 & 0.41 \\ 0.56 & 0.31 & -0.31 & -0.56 & -0.31 & 0.31 \\ 0.56 & -0.31 & -0.56 & 0.31 & 0.31 & -0.56 \\ 0.41 & -0.41 & -0.41 & 0.41 & 0.41 & -0.41 \\ 0.31 & -0.56 & 0.56 & -0.31 & -0.31 & 0.56 \\ 0.31 & -0.41 & 0.41 & -0.31 & 0.31 & -0.41 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

The signal x in this basis will have coefficients

$$s = \Psi^{-1}x. \quad (20)$$

Due to the presence of a sharp outlier (sensor #4), the vector s will not be perfectly sparse, but several of its coefficients will be significantly larger than the others. We assume that s has only $K = 2$ significant components ($K \ll N$).

We will use the simplified formula CS (15), where y is a vector of compressed measurements of size 3×1 , Φ is a measurement matrix of size 3×6 . Its elements are often generated randomly (for example, from a normal distribution). An example of a measurement matrix Φ (3×6):

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Let us move on to CS and calculate the vector using formula (16):

$$y = [20.5, -15, -39.5]. \quad (22)$$

Instead of transmitting all 6 values (17), we transmit only $M = 3$ numbers (22) over the radio channel. The energy saving was 50 %. M is chosen so that $M < N$, but $M > K$ (ideally $M \approx 2K$).

Now let us move on to restoring the signal on the server.

The server receives the vector y and knows the matrices Φ and Ψ . It must solve problem (4), which we present in a simplified form, similar to (16), neglecting noise:

$$y = As. \quad (23)$$

This is a system of linear equations with 6 unknowns s and only 3 equations y . This is an indeterminate system that has many solutions.

We apply the sparsity condition, that is, we look for the solution s that has the smallest number of non-zero elements. This is the so-called L0-norm – the number of non-zero elements. However, the problem of minimizing the L0-norm is NP-hard.

Therefore, we decide to minimize the L1-norm, which corresponds to the sum of the absolute values of the elements s , which is a convex optimization problem often leads to a sparse solution.

The formal formulation of the BP optimization problem [4] is to minimize the sum of the absolute values of the coefficients s , provided that the compressed measurements exactly match the model given in formula (5).

To obtain an estimate of the sparse vector \hat{s} , the server applies the OMP reconstruction algorithm, which iteratively identifies the support of the signal and solves a sequence of small linear least-squares problems, using (8)–(11).

Finally, the server constructs the full sparse estimate \hat{s}

$$\hat{s} = \text{embed}(s_s \text{ into an } N\text{-dimensional vector with zeroes elsewhere}). \quad (24)$$

After that, it calculates the estimate of the original signal using formula (6). Expected result:

$$\hat{x} \approx [22, 23, 22.5, 23, 21, 22]. \quad (25)$$

Although sensor #4 reported an absurd value of 60 °C, the recovery algorithm, based on the assumption of rarefaction (temperature uniformity), correctly estimated the true temperature of ~23 °C (25) at this point and detected the anomaly.

The process diagram is shown in Fig. 1, which depicts the two-way data compression and recovery process in a distributed monitoring system.

The process begins with data collection from 6 temperature sensors, formation of a measurement vector and its compression by linear transformation using a measurement matrix. The compressed data is transmitted via a wireless communication channel to the server, where an optimization procedure is performed to restore the original signal based on the known measurement matrices and the transformation basis. Let us note the key stages:

1. Data generation and compression on the transmitter side.
2. Wireless transmission of reduced data.
3. Signal recovery by optimization on the server.
4. Anomaly detection and further data processing.

The proposed architecture demonstrates an effective approach to energy saving in WSNs by transmitting CS instead of the full data set. The use of the mathematical apparatus of compressive measurement allows not only to reduce the amount of transmitted information by 50 %, but also to effectively detect anomalies in the operation of sensors. This is achieved due to the property of signal sparsity in a certain basis and the use of optimization methods for accurate information recovery at the receiving end.

The recovery algorithm on the server uses knowledge of the data structure (sparseness) to extract complete information from incomplete measurements. This is a vivid example of the synergy of a mathematical model and computational intelligence.

Conclusions. The linear algebraic model of WSN is fundamental for CS applications, especially for temperature monitoring in greenhouses. The temperature field is spatially correlated and exhibits a low-dimensional structure, which is ideal for a sparse representation. This paper explores a linear algebraic model structure that clearly formulates the compression process for greenhouse WSNs. The architecture of a CS system for WSN is presented, thanks to which the system functions effectively under conditions of variable communication quality and failure of individual sensors. Built-in machine learning algorithms ensure continuous improvement of the quality of service. The architecture supports the dynamic addition of new sensors without changing the basic structure. The proposed extended architecture significantly increases the efficiency of modern Internet of Things systems, industrial monitoring systems, and smart cities, ensuring reliability, energy efficiency, and high quality of service at minimal data transmission costs. By describing measurement, rarefaction, and reconstruction as transformations

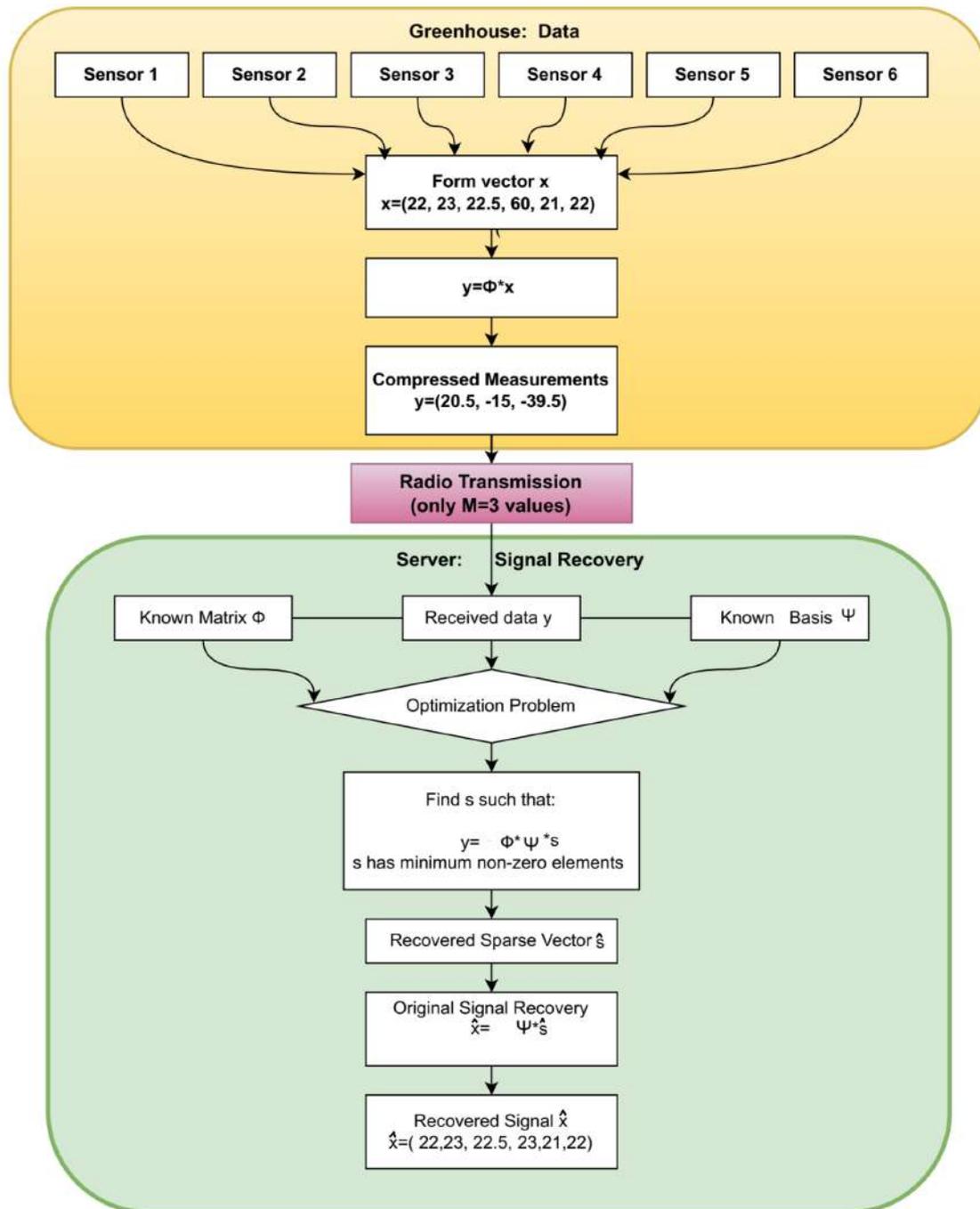


Fig. 1. Architecture of a compression measurement system for wireless sensor networks

in linear vector spaces, we emphasize both the mathematical rigor and practical effectiveness of this approach for creating energy-efficient intelligent agricultural systems. Energy savings in sensor data transmission are achieved by transmitting not all data.

Future research may investigate adaptive sensing matrices that update based on earlier measurements, enabling even more efficient data collection. Smarter sampling patterns could further reduce sensor energy consumption, while hybrid methods that combine OMP with other reconstruction techniques may improve accuracy at low computational cost. More advanced spatio-temporal or tensor-based models could better capture complex temperature variations inside real greenhouses. Distributed reconstruction approaches would allow sensors to cooperate locally, increasing robustness and reducing the workload on the central server. Additional work is also needed to handle sensor faults, noise, and missing readings. Integrating machine-learned priors or physics-based models, such as heat diffusion equations, may provide more realistic and stable sparse representations. Finally, large-scale experiments in real greenhouse environments will be essential for validating and improving the proposed framework.

Bibliography:

1. Wang X., Chen H. A Survey of Compressive Data Gathering in WSNs for IoTs, *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022 (1), 4490790. <https://doi.org/10.1155/2022/4490790>
2. Mahdaoui A. E., Ouahabi A., Moulay M. S. Image denoising using a compressive sensing approach based on regularization constraints. *Sensors*, 2022. 22(6), 2199. <https://doi.org/10.3390/s22062199>
3. Baroli D., Harbrecht H., Multerer M. Samplet basis pursuit: Multiresolution scattered data approximation with sparsity constraints. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2024. 72, 1813–1823. <https://doi.org/10.1109/TSP.2024.3382486>
4. Li B., Zhang S., Zhang L., Shang X., Han C., Zhang Y. Robust sensing matrix design for the Orthogonal Matching Pursuit algorithm in compressive sensing. *Signal Processing*, 2025. 227, 109684. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2024.109684>
5. Kiseleva E. M., Prytomanova O. M., Hart L. L., Zaytseva T. A., Kuzenkov O. O. Application of mathematical methods of artificial intelligence to solve problems of optimal set partitioning. *Питання прикладної математики та математичного моделювання*, 2024. 27, 89–98. <https://doi.org/10.15421/32242401>
6. Xu Y., Ma Z., Li Y., Yang W., Wang H. A modified capacitance tomography image reconstruction approach based on iterative shrinkage-thresholding algorithm combined with deep networks. *Measurement Science and Technology*, 2024. 35(11), 115409. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad6c71>
7. Dong G. S., Wan H. P., Luo Y., Li B., Xu X. An improved approach for compressive sensing of vibration signals considering spectral leakage effect. *Structural Health Monitoring*, 2025. 1. <https://doi.org/10.1177/14759217251323201>
8. Ракицький В. А. Дискретне косинусне перетворення як засіб комп'ютерної обробки інформації. *Problems of Informatization and Management*, 2019. 2(62), 53–56. [https://doi.org/10.18372/2073-4751.2\(62\).14472](https://doi.org/10.18372/2073-4751.2(62).14472)
9. Middy R., Chakravarty N., Naskar M. K. Compressive Sensing in Wireless Sensor Networks – a Survey. *IETE Technical Review*, 2017. 34(6), 642–654. <https://doi.org/10.1080/02564602.2016.1233835>
10. Luo Ch., Wu F., Jun Sun J., Chen Ch. W. *Compressive data gathering for large-scale wireless sensor networks*. In Proceedings of the 15th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '09). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2009. 145–156. <https://doi.org/10.1145/1614320.1614337>
11. Azarnia G., Sharifi A. A. Performance improvement of OFDM systems using compressive sensing with group LASSO signal reconstruction algorithm. *Wireless Networks*, 2022. 28(8), 3771–3778. <https://doi.org/10.1007/s11276-022-03080-z>
12. Zheng H., Li J., Feng X., Guo W., Chen Z., Xiong N. Spatial-Temporal Data Collection with Compressive Sensing in Mobile Sensor Networks. *Sensors*, 2017. 17(11), 2575. <https://doi.org/10.3390/s17112575>

References:

1. Wang, X. & Chen, H. (2022). A Survey of Compressive Data Gathering in WSNs for IoTs, *Wireless Communications and Mobile Computing*, (1), 4490790. <https://doi.org/10.1155/2022/4490790>
2. Mahdaoui, A. E., Ouahabi, A., & Moulay, M. S. (2022). Image denoising using a compressive sensing approach based on regularization constraints. *Sensors*, 22(6), 2199. <https://doi.org/10.3390/s22062199>
3. Baroli, D., Harbrecht, H., & Multerer, M. (2024). Samplet basis pursuit: Multiresolution scattered data approximation with sparsity constraints. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 72, 1813–1823. <https://doi.org/10.1109/TSP.2024.3382486>
4. Li, B., Zhang, S., Zhang, L., Shang, X., Han, C., & Zhang, Y. (2025). Robust sensing matrix design for the Orthogonal Matching Pursuit algorithm in compressive sensing. *Signal Processing*, 227, 109684. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2024.109684>
5. Kiseleva, E. M., Prytomanova, O. M., Hart, L. L., Zaytseva, T. A., & Kuzenkov, O. O. (2024). Application of mathematical methods of artificial intelligence to solve problems of optimal set partitioning. *Issues of Applied Mathematics and Mathematical Modeling*, vol. 27, pp. 89–98. <https://doi.org/10.15421/32242401>
6. Xu, Y., Ma, Z., Li, Y., Yang, W., & Wang, H. (2024). A modified capacitance tomography image reconstruction approach based on iterative shrinkage-thresholding algorithm combined with deep networks. *Measurement Science and Technology*, 35(11), 115409. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad6c71>
7. Dong, G. S., Wan, H. P., Luo, Y., Li, B., & Xu X. (2025). An improved approach for compressive sensing of vibration signals considering spectral leakage effect. *Structural Health Monitoring*, 1. <https://doi.org/10.1177/14759217251323201>
8. Rakitskyi, V. A. (2019). Dyskretne kosynusne peretvorennia yak zasib komp'uternoї obrobky informatsii. *Problems of Informatization and Management*, 2(62), 53–56. [https://doi.org/10.18372/2073-4751.2\(62\).14472](https://doi.org/10.18372/2073-4751.2(62).14472)
9. Middy, R., Chakravarty, N., & Naskar, M. K. (2017). Compressive Sensing in Wireless Sensor Networks – a Survey. *IETE Technical Review*, 34(6), 642–654. <https://doi.org/10.1080/02564602.2016.1233835>
10. Luo, Ch., Wu, F., Jun Sun, J., & Chen, Ch. W. (2009). *Compressive data gathering for large-scale wireless sensor networks*. In Proceedings of the 15th annual international conference on Mobile computing and

networking (MobiCom '09). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 145–156. <https://doi.org/10.1145/1614320.1614337>

11. Azarnia, G., & Sharifi, A. A. (2022). Performance improvement of OFDM systems using compressive sensing with group LASSO signal reconstruction algorithm. *Wireless Networks*, 28(8), 3771–3778. <https://doi.org/10.1007/s11276-022-03080-z>

12. Zheng, H., Li, J., Feng, X., Guo, W., Chen, Z., & Xiong, N. (2017). Spatial-Temporal Data Collection with Compressive Sensing in Mobile Sensor Networks. *Sensors*, 17(11), 2575. <https://doi.org/10.3390/s17112575>

Дата першого надходження статті до видання: 18.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ

УДК 004.056.55

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2026-1-71.18>

Савченко Ю. В., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-7177-6311

Воскобойник В. О., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інформаційної безпеки та наноелектроніки
Національного університету «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0003-3786-8666

Корнейко О. В., кандидат технічних наук, професор,
професор кафедри інформаційних технологій та кібербезпеки
Національної академії внутрішніх справ
ORCID: 0000-0002-1882-9680

Зудова С. М., здобувач вищої освіти кафедри кібербезпеки
та інформаційних технологій Університету митної справи
та фінансів
ORCID: 0009-0008-6160-922X

ЛІНІЙНІ РЕКУРЕНТНІ СПІВВІДНОШЕННЯ У СИСТЕМІ СИМЕТРИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ШИФРУВАННЯ

В статті запропоновано принципи функціонування симетричного шифрування на основі гама-шифру отриманого шляхом генерування лінійних рекурентних співвідношень. Досліджено вплив лінійного рекурентного співвідношення на криптографічну стійкість алгоритмів, а також наведено приклади практичного застосування рекурентних моделей у забезпеченні процесу шифрування. Отриманий методом гамування в основі якого задіяно лінійне рекурентне співвідношення, зашифрований текст є достатньо трудомістким для розкриття в тому випадку, якщо гама-шифр не містить повторюваних бітових послідовностей і змінюється випадковим чином для кожного зашифрованого слова. Якщо період гама перевищує довжину всього зашифрованого тексту і невідома жодна частина вихідного тексту, то шифр можна розкрити тільки прямим перебором множини ймовірних ключових значень в цьому випадку криптостійкість визначається розміром ключа. Те, на скільки утворена гама відповідає вимогам безпеки у більшості випадків залежить від початкових даних, на основі яких генерується лінійне рекурентне співвідношення. Максимальне значення періоду послідовності цілковито залежить від глибини лінійного рекурентного співвідношення та співвідношення, що її задає, а конкретні значення – від початкового стану послідовності. Підвищити криптостійкість алгоритму можна шляхом об'єднання кількох різних лінійних рекурентних співвідношень в контексті LFSRs та/або застосуванням нелінійних функцій в зворотному зв'язку регістра, нелінійної логіки і фільтрації вмісту регістра.

Симетричний алгоритм шифрування на основі лінійного рекурентного співвідношення допускає як програмну, так і апаратну реалізацію. З точки зору практичності, програмна реалізація допускає більшу гнучкість у використанні. Однак реалізація алгоритмів шифрування в основному кодї програми провокує чисельні безпекові ризики пов'язані здебільш із несанкціонованим доступом та питаннями конфіденційності повідомлення. Для вирішення такої проблеми доречно застосовувати практику виводу функцій шифрування та/або дешифрування в окремі модулі або бібліотеки, а також передавати захищений ключ використовуючи лише захищені канали.

У статті описано, як функціонує на основі встановлення залежностей між членами невідомої послідовності та індексу лінійне рекурентне співвідношення. Поточний метод набув широкого застосування в аналізі алгоритмів, цифровій обробці сигналів, економіці, а в контексті криптографії нерідко використовується в рамках симетричного шифрування.



© Ю. В. Савченко, В. О. Воскобойник, О. В. Корнейко, С. М. Зудова, 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

У статті визначено, що модульний підхід передбачає розділення програмного забезпечення на логічно незалежні частини, кожна з яких виконує окрему функцію. При перетворенні модуля на динамічну бібліотеку головна програма буде лише викликати функцію за потреби повністю приховуючи доступ до коду алгоритму. Таким чином криптографічні операції будуть реалізуватися ізольовано, що дозволить зменшити ризик несанкціонованого доступу до алгоритму шифрування.

Ключові слова: симетричне шифрування, криптографія, шифрування, гама-шифр, лінійні рекурентні послідовності, алгоритм перетворення, дешифрування, алгоритмізація.

Savchenko Iu. V., Voskoboinyk V. O., Korneiko O. V., Zydova S. M. Linear recurrent relations in the system of symmetric encryption algorithms

The article proposes the principles of functioning of symmetric encryption based on a gamma cipher obtained by generating linear recurrence relations. The influence of a linear recurrence relation on the cryptographic stability of algorithms is investigated, and examples of practical application of recurrent models in ensuring the encryption process are also given. The encrypted text obtained by the gamma method based on a linear recurrence relation is quite laborious to reveal if the gamma cipher does not contain repeated bit sequences and changes randomly for each encrypted word. If the gamma period exceeds the length of the entire encrypted text and no part of the original text is known, then the cipher can be revealed only by direct search of the set of probable key values, in this case, the cryptographic stability is determined by the size of the key. The extent to which the formed gamma meets the security requirements in most cases depends on the initial data on the basis of which the linear recurrence relation is generated. The maximum value of the sequence period depends entirely on the depth of the linear recurrence relation and the relation that sets it, and the specific values – on the initial state of the sequence. The cryptographic strength of the algorithm can be increased by combining several different linear recurrence relations in the context of LFSRs and/or by using nonlinear functions in the register feedback, nonlinear logic and filtering of the register contents. The symmetric encryption algorithm based on the linear recurrence relation allows for both software and hardware implementation. From the point of view of practicality, software implementation allows for greater flexibility in use. However, the implementation of encryption algorithms in the main program code provokes numerous security risks associated mainly with unauthorized access and message confidentiality issues. To solve such a problem, it is appropriate to apply the practice of removing encryption and/or decryption functions to separate modules or libraries, as well as transmitting the protected key using only protected channels. The article describes how a linear recurrence relation functions based on establishing dependencies between members of an unknown sequence and an index. The current method has found wide application in algorithm analysis, digital signal processing, economics, and in the context of cryptography it is often used within the framework of symmetric encryption. The article defines that a modular approach involves dividing software into logically independent parts, each of which performs a separate function. When converting a module into a dynamic library, the main program will only call the function, when necessary, completely hiding access to the algorithm code. Thus, cryptographic operations will be implemented in isolation, which will reduce the risk of unauthorized access to the encryption algorithm.

Key words: symmetric encryption, cryptography, encryption, gamma cipher, linear recurrent sequences, transformation algorithm, decryption, algorithmization.

Постановка проблеми. Проблема забезпечення захисту інформації шляхом її цілеспрямованого перетворення, яке унеможливує несанкціоноване сприйняття змісту сторонніми особами, є актуальною з найдавніших часів [7]. В рамках поточної проблематики виникли два фундаментальні напрями – криптографія та криптоаналіз, що мають між собою цілком протилежні цілі. Криптографія спрямована на розроблення та теоретичне обґрунтування математичних методів перетворення інформації. Криптоаналіз, у свою чергу, досліджує методи розкриття або обходу криптографічних систем без знання ключів шифрування.

Проблема використання криптографічних методів в інформаційних системах стала особливо актуальною через стрімке зростання обсягів електронних даних, розвиток цифрових технологій і збільшення кількості кіберзагроз. У сучасному світі інформація є одним із найцінніших ресурсів, тому її захист від несанкціонованого доступу, підроблення чи втрати набуває першочергового значення.

Криптографічні системи розділяються на симетричні і асиметричні (з відкритим ключем). У випадках, коли головним пріоритетом є швидкодія – симетричні криптографічні алгоритми постають найбільш ефективним рішенням в порівнянні з асиметричними, адже в них не використовуються складні арифметичні операції, а деякі етапи зводяться до простих перетворень. Тому їх доречно застосовувати для шифрування повідомлень або файлів великих розмірів [11–13].

В симетричному шифруванні широко використовується метод гамування, принцип якого полягає в генерації гама-шифру за допомогою псевдовипадкової послідовності і накладення отриманої гама-шифру (певної послідовності γ) на відкриті дані (відкритий текст T) зверненим способом. Шифри гамування (адитивні шифри) постають одними з найефективніших серед симетричних шрифтів з огляду на стійкість та процес швидкості перетворень (процедур шифрування і дешифрування). У гама-шифрах в загальному випадку використовується операція додавання по модулю N і в окремих випадках (що орієнтовані на програмну реалізацію) додавання по модулю 2.

Оскільки в симетричному шифруванні для шифрування і для розшифрування використовується той самий ключ, під час гама-шифрування однією з важливих проблем, постає генерування непередбачуваних

двійкових послідовностей великої довжини. Для розв'язання цієї проблеми широко використовуються генератори двійкових псевдовипадкових послідовностей, серед яких можна виділити лінійні рекурентні послідовності (далі – ЛРП) (такі послідовності, ще іноді називають зворотними послідовностями).

Теорія лінійних рекурентних послідовностей є точним аналогом теорії лінійних диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами. Частковими випадками лінійних рекурентних послідовностей є такі послідовності як: арифметична прогресія, геометрична прогресія, числа Фібоначчі, числа Люка, числа трибоначчі, послідовності Люка. Також рекурентні співвідношення мають принципове значення в економіці, цифровій обробці сигналів, комбінаториці, біології, аналізі алгоритмів (з метою описати час роботи певного алгоритму), тощо [1, 8, 9].

Мета статті. Метою статті є дослідження рекурентних співвідношень в системі симетричних криптографічних алгоритмів з метою виявлення закономірностей їх побудови та оцінки їх впливу на стійкість алгоритму гама-шифрування.

Виклад основного матеріалу

Огляд лінійних рекурентних послідовностей. На практиці найчастіше в якості гама-шифру γ виступає двійкова (бітова) послідовність, оскільки до неї дуже зручно використовувати для накладання операцію виключного АБО (XOR) за формулою 1:

$$P = T \oplus \gamma. \quad (1)$$

Оскільки в симетричному шифруванні один і той самий ключ має бути наявний і у відправника, і у отримувача, а гама-шифр має таку ж довжину, як і повідомлення – її недоцільно передавати по каналах зв'язку.

Поточна проблема може бути вирішена шляхом незалежного генерування гама-шифру на боці відправника і на боці отримувача завдяки генераторам псевдовипадкових послідовностей. Відповідно по захищеному каналу зв'язку передається не сама гама, а лише початковий стан генератора. Генератор псевдовипадкових послідовностей може функціонувати на основі лінійних рекурентних послідовностей (ЛРП).

Рекурентна послідовність виступає одним з видів рівняння, що визначає послідовність чисел, де кожен член залежить від попередніх на основі деякого правила. Загальних правил розв'язання рекурентних співвідношень не існує. Проте існує клас рекурентних співвідношень, який розв'язується єдиним методом. Це однорідне співвідношення із сталими коефіцієнтами, що задається у вигляді: (2)

$$x_{k+n} = a_1 \cdot x_{k+n-1} \oplus a_2 \cdot x_{k+n-2} \oplus \dots \oplus a_{n-1} \cdot x_{k+1} \oplus a_n \cdot x_k, \quad (2)$$

де $k = 1, 2, \dots$

Члени послідовності x_i і коефіцієнти a_i – значення із множини $\{0, 1\}$.

Величина n – глибина послідовності, що визначається різницею між найстаршим і наймолодшим індексами елементів в запису послідовності. Початковим станом псевдовипадкової послідовності виступають перші n значень x_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

Задача розв'язання рекурентного співвідношення полягає в знаходженні невідомої послідовності. Теоретично, така послідовність має нескінченно багато розв'язків. Зазвичай, кількість таких розв'язків обмежується заданням значень початкових членів невідомої послідовності. Рекурентне співвідношення k -го порядку називається лінійним, якщо кожен наступний член цього рекурентного співвідношення є лінійною комбінацією k попередніх членів.

Розв'язки рекурентного співвідношення поділяють на загальний та частковий. Загальним розв'язком вважається такий, що залежить від довільних сталих, які можуть бути підібраними при будь-яких початкових умовах, він визначає як суму однорідних і часткових розв'язків. Частковим розв'язком в свою чергу називається будь-який розв'язок, що може бути отриманий із загального, встановленням значень його сталих [2].

Наприклад, для заданої ЛРП співвідношенням $x_{k+3} = x_{k+2} \oplus x_k$, усього можливих ключів: $2^3 = 8$. При початковому стані, наприклад $x_1 = 1, x_2 = 1, x_3 = 0$ розв'язання системи набуває наступного вигляду:

$$\begin{aligned} x_4 &= x_2 \oplus x_1 = 1 \oplus 1 = 0; & x_{11} &= x_9 \oplus x_8 = 1 \oplus 1 = 0; \\ x_5 &= x_3 \oplus x_2 = 0 \oplus 1 = 1; & x_{12} &= x_{10} \oplus x_9 = 0 \oplus 1 = 1; \\ x_6 &= x_4 \oplus x_3 = 0 \oplus 0 = 0; & x_{13} &= x_{11} \oplus x_{10} = 0 \oplus 0 = 0; \\ x_7 &= x_5 \oplus x_4 = 1 \oplus 0 = 1; & x_{14} &= x_{12} \oplus x_{11} = 1 \oplus 0 = 1; \\ x_8 &= x_6 \oplus x_5 = 0 \oplus 1 = 1; & x_{15} &= x_{13} \oplus x_{12} = 0 \oplus 1 = 1; \\ x_9 &= x_7 \oplus x_6 = 1 \oplus 0 = 1; & x_{16} &= x_{14} \oplus x_{13} = 1 \oplus 0 = 1; \\ x_{10} &= x_8 \oplus x_7 = 1 \oplus 1 = 0; & x_{17} &= x_{15} \oplus x_{14} = 1 \oplus 1 = 0; \end{aligned}$$

Звідси можна помітити, що після виконання 7 такту починається перехід у початковий стан. Отже лінійна рекурентна послідовність набуває вигляду 1100101.... Після формування ЛРП, для шифрування

повідомлення (наприклад “Coding”) наступним кроком буде переведення вхідного тексту у двійковий вигляд для накладення отриманої гами-шифру (1100101) через операцію додавання за модулем (XOR). Отже, процес шифрування виглядає наступним чином:

```
Coding = 01000011 01101111 01100100 01101001 01101110 01100111
XOR
Гама шифр = 11001011 10010111 00101110 01011100 10111001 01110010
Результат = 10001000 11110000 01001010 00110101 11010111 00010101 в hex цей вираз набуде вигляду
“88F04A35D715”.
```

Процес дешифрування гами-шифру в основі якого лежить створення гами на основі ЛРП здійснюється для повторної генерації гами-шифру сформованого лише при наявності відомого ключа та накладанні такої ж гами на зашифровані дані, згідно формулі 1.

$$T = P \oplus \gamma. \quad (3)$$

Отже, першим кроком для розшифрування є переведення зашифрованого повідомлення у бітовий вигляд. Надалі, знаючи глибину ЛРП (n), для розкриття закону формування лінійно-рекурентної послідовності має бути перехоплено (або відтворено методом підбору) 2^n поряд розміщених вірних бітів, що формують ділянку ЛРП $\{x_{k+1}, x_{k+2}, \dots, x_{k+2n}\}$. Внаслідок, отриманої ділянки послідовності, криптоаналітик може вирахувати наступні коефіцієнти відповідного рекурентного співвідношення, розв’язавши систему відносно a_i [3].

Наприклад для розглянутого вище зашифрованого повідомлення, за умови, що криптоаналітику відомий початковий стан ($x_1 = 1, x_2 = 1, x_3 = 0$) процес шифрування виглядає наступним чином:

```
88f04a35d715 = 01000011 01101111 01100100 01101001 01101110 01100111
XOR
Гама-шифр = 11001011 10010111 00101110 01011100 10111001 01110010
Результат = 10001000 11110000 01001010 00110101 11010111 00010101 що відповідає слову «Coding».
```

Однак, в умовах, коли початковий стан залишається невідомим, для дешифрування повідомлення можна скористатися (за їх наявності) відомостями про глибину послідовності n .

Наприклад, якщо відомо, що кількісне значення ключів – 3 біти: (x_1, x_2, x_3) , усього можливих варіантів ключів для дешифрування 2^3 , що в поточному випадку відповідає $2^3 = 8$. Отже, для дешифрування повідомлення треба перебрати всі можливі варіанти комбінацій ключа (в даному випадку, такими комбінаціями постають 000, 111, 001, 011, 110, 101, 010, 100) й на основі результатів після утворення від кожного відповідного ключа послідовності, виконати із кожною послідовністю операцію додавання за модулем. Після цього, перебравши всі отримані 2^n варіантів результатів – віднайти той, за яким виходить осмислений результат.

Загалом, для реалізації криптографічно стійкого потокового симетричного на основі гами-шифру пред’являються три основні вимоги:

1) Важливою з точки зору криптографічної стійкості характеристикою генератора на ЛРП є період генерованої послідовності, оскільки період гами повинен бути досить великим для шифрування повідомлень різної довжини.

У ЛРП максимальний період послідовності глибини n дорівнює T_{\max} . Значення T_{\max} цілковито залежить від початкових умов ЛРП та підкріплюється визначенням характеристичного многочлену ЛРП. Характеристичним – є многочлен, який отримують з однорідного лінійного рекурентного рівняння, замінивши член послідовності a_n на змінну λ , а попередні члени – на відповідні степені цієї змінної, при цьому в якості коефіцієнтів многочлена постають коефіцієнти рекурентного рівняння). Характеристичний многочлен лінійної рекурентної послідовності певної глибини послідовності n називається многочленом ступеня n : (

$$f(\lambda) = \lambda^n + a_1 \cdot \lambda^{n-1} + a_2 \cdot \lambda^{n-2} + \dots + a_{n-1} \cdot \lambda + a_n. \quad (4)$$

Отриманий многочлен, який не можна розкласти на множники нижчого ступеня, називається незвідним та виступає аналогом простого числа. Незвідними многочленами першого і другого ступеня є: $\lambda, \lambda + 1, \lambda^2 + \lambda + 1$. При цьому, якщо многочлен є незвідним, то він є дільником многочлена $\lambda^{2^n} + 1$. Порядком незвідного многочлена $f(\lambda)$ називається найменше число s , таке що многочлен $\lambda s + 1$ ділиться на многочлен $f(\lambda)$. Якщо характеристичний многочлен послідовності є незвідним, то період послідовності дорівнює порядкові цього многочлена.

Відомо, що многочлен $\lambda^m + 1$ ділиться на многочлен $\lambda^k + 1$ тільки у тому випадку, якщо m ділиться на k . Таким чином, порядок s незвідного многочлена є дільником числа $2^n - 1$. Звідси, якщо характеристичний многочлен лінійної рекурентної послідовності є незвідним, то період послідовності T буде дільником значення T_{\max} . Отже, якщо характеристичний многочлен ЛРП є незвідним і T_{\max} – просте число, то період послідовності дорівнює T_{\max} при будь-яких початкових значеннях, окрім всіх нулів. Звідси, якщо характеристичний многочлен ЛРП є незвідним і при цьому T_{\max} – просте число, то період послідовності дорівнює T_{\max} при будь-яких початкових значеннях (винятком є послідовність, що повністю складається з нулів) [4].

2) Гама повинна бути практично непередбачуваною, що означає неможливість передбачити наступний біт гами, навіть якщо відомі тип генератора й попередній відрізок гами.

Для ускладнення задачі криптоаналізу і забезпечення поточним вимогам, поряд із ЛРП в чистому вигляді нерідко застосовують наступні методи підвищення криптостійкості алгоритму:

Застосування ЛРП у генераторах регістрів зсуву (LFSRs – Linear Feedback Shift Registers). Цей метод представляє собою комбінування декількох генераторів псевдовипадкових послідовностей на основі ЛРП, що результати об'єднуються в один, синхронізуючи їхні виходи через відповідну операцію. Такі генератори можуть мати як однакову так і різну глибину послідовності.

Як приклад, розглянемо генерування гами-шифром методом комбінації двох послідовностей для повідомлення довжиною 6 байт. Нехай глибина лінійного рекурентного співвідношення $n = 3$, при цьому значення ключів першого випадку $x_1 = 1, x_2 = 1, x_3 = 0$ та значення ключів другого випадку відповідно $x_1 = 1, x_2 = 0, x_3 = 1$ (період послідовності в цьому випадку 1011100...). За поточних умов, гама-шифр отримується наступним чином:

```
ЛРП1 = 01000011 01101111 01100100 01101001 01101110 01100111
XOR
ЛРП2 = 10111001 01110010 11100101 11001011 10010111 00101110
Гама-шифр = 11111010 00011101 10000001 10100010 11111001 01001001
```

Як бачимо, в отриманому гама шифрі довжиною 48 біт чіткий період не прослідковується, отже можна зробити висновок, що перевагою методу комбінації кількох ЛРП для формування гами є те, що результуюча послідовність має значні періоди, в результаті чого, отриманий гама-шифр набуває більшої непередбачуваності.

Таким чином, для здійснення дешифрування недостатньо знати лише початкові умови або розмірність якогось одного рекурентного рівняння. Криптоаналітику в цьому випадку, як мінімум треба володіти інформацією як про кількість послідовностей, що приймають участь у створенні гами-шифру, і мати уявлення про відповідні рекурентні рівняння (знати їх глибину та/або початкові значення (ключі)).

Теоретично в розглянутому методі, кількість різних згенерованих ЛРП для синхронізації кількісно не обмежується, якщо щоразу передавати послідовності різних розмірностей. Однак, у випадку якщо для генерації гами-шифру використовувати ЛРП при статичній глибині, то максимально можлива кількість послідовностей для синхронізації визначається відповідно до максимальної кількості значень її ключів – 2^n .

Також, ускладнити створення гами можна використовуючи перетворення через нелінійні функції в зворотному зв'язку регістра або нелінійну логіку і фільтрацію вмісту регістра. Розв'язки нелінійних рекурентних співвідношень можна знаходити за допомогою генератрис [5].

3) Генерування гами не повинне викликати великих технічних складностей. Розглянутий симетричний алгоритм шифрування на основі ЛРП є досить зрозумілим через застосування простих математичних перетворень і відповідно допускає як програмну, так і апаратну реалізацію. Однак, з точки зору практичності, програмна реалізація допускає більшу гнучкість у використанні.

Зважаючи на це, в рамках дослідження було розроблено відповідну прикладну програмну реалізацію, що включає в себе автоматичну обробку розглянутих алгоритмів симетричного шифрування/дешифрування методом накладання гами-шифру на основі генератора ЛРП на мові програмування Python за допомогою створення відповідних функцій `crypto()` та `decrypt()`.

Програмна реалізація шифрування на основі ЛРП.

```
#Програмна реалізація шифрування на основі ЛРП
import itertools, random
def crypto(text: str, key_len: int) -> str:
    LRP = []
    text_bit, Bit_res = '', ''
    for i in text:
        for j in format(ord(i), '08b'):
            text_bit += str(j)
    #print('Вхідне повідомлення у бітах:', text_bit)
    for i in range(key_len):
        LRP.append(random.randint(0, 1))
    #print('Ключ:', LRP)
    for i in range(len(text_bit) - key_len):
        sub_seq = LRP[i:key_len + i]
        for j in range(key_len - 2):
            if sub_seq[j] != sub_seq[j + 1]:
                sub_seq.append(1)
            else:
```

```

        sub_seq.append(0)
        LRP.append(sub_seq[-1])
    #print('Гамма шифр: ', *LRP)
    for i in range(len(text_bit)):
        if text_bit[i] != str(LRP[i]):
            Bit_res += '1'
        else:
            Bit_res += '0'
    return Bit_res
def encrypt(code: str, key_len: int) -> list:
    Bit_res = []
    bit = ''
    LRP = [list(p) for p in itertools.product([0, 1], repeat=key_len)]
    #print('Можливі комбінації ключа')
    #for i in range(len(LRP)):
    #    #print(LRP[i])
    for i in range(len(LRP)):
        for j in range(len(code) - key_len):
            sub_seq = LRP[i][j:key_len + j]
            for k in range(key_len - 2):
                if sub_seq[k] != sub_seq[k + 1]:
                    sub_seq.append(1)
                else:
                    sub_seq.append(0)
            LRP[i].append(sub_seq[-1])
    #print('Можливі гама-вставки: ')
    for i in range(len(LRP)):
        #print(LRP[i])
        for j in range(len(code)):
            if code[j] != str(LRP[i][j]):
                bit += '1'
            else:
                bit += '0'
        Bit_res.append(bit[1::])
        bit = ''
    return Bit_res
my_text = input('Вхідне повідомлення: ')
key = random.randint(3, 10)
code = crypto(my_text, key)
print('Зашифроване повідомлення: ', code)
encode = encrypt(code, key)
print('Розшифровані варіації повідомлення: ')
for i in range(len(encode)):
    print(f'{i + 1}) {encode[i]}')

```

Функція `crypto()` створена з метою кодування інформації. Вона оброблює дві складові (вхідні дані):
`text` – первинне повідомлення зміст якого необхідно приховати. Таке повідомлення, представляється різними способами, найчастіше, у вигляді текстів, записаних у деякому алфавіті (наприклад повідомлення текстом “Math”);

`key_len` – глибина послідовності, що задається в діапазоні від 3 до 10 (варто зазначити, що поточний діапазон може бути змінений або розширений для конкретних індивідуальних випадків. Однак в рамках написання прикладної програми були обрані значення, результат яких можна представити більш наочно).

В першу чергу, вхідне повідомлення переводиться в бітовий вигляд. Надалі, відбувається генерація сукупність даних, які визначають вибір конкретного перетворення з усієї множини перетворень, що реалізуються шифром. Отримавши глибину ЛРП, на основі випадковості ключові значення x_1, x_2, \dots, x_n обираються випадковим чином із множини $\{0, 1\}$ методом `random.randint(0, 1)`.

Як бачимо, ключ знаходиться тільки у внутрішньому середовищі функції, тому для подальшого дешифрування ці значення будуть залишатися невідомими. В поточному випадку, згенероване значення глибини послідовності `key_len = 3`, а відповідний згенерований ключ набув вигляду $x_1 = 0, x_2 = 0, x_3 = 1$.

На основі початкових (згенерованих) значень ключа, використовуючи загальну формулу формування ЛРП, формується відповідна гама що за своїм розміром дорівнює бітовій довжині вхідного повідомлення. Після цього, методом виняткової диз'юнкції (більш відома як операція XOR) визначається умова: якщо

значення біту вхідного повідомлення на певній позиції $i = 1, 2, 3 \dots$ не відповідає значенню біту геми-шифру на тій самій позиції (коли лише один із вхідних операндів є «істинним») – результуюча послідовність (зашифроване повідомлення) доповнюється значенням 1. В іншому випадку, якщо біти однакові – послідовність доповнюється значенням 0 (рис. 1).

```

Вхідне повідомлення: Math
Вхідне повідомлення у бітах: 01001101011000010111010001101000
Ключ: [0, 0, 1]
Гамма шифр: 0 0 1 0 1 1 1 0 0 1 0 1 1 1 0 0 1 0 1 1 1 0 0 1 0 1 1 1 0 0 1 0
Зашифроване повідомлення: 01100011001111011100110100011010

```

Рис. 1. Виконання алгоритму шифрування

Функція `encrypt()` в свою чергу слугує для розшифрування повідомлення і також приймає два аргументи:

`code` – закодоване повідомлення, зміст якого необхідно розкрити (отримане в ході застосування функції `encrypt()` до повідомлення у попередньому прикладі);

`key_len` – глибина послідовності, що має те ж значення, що передавалося у функцію для шифрування (`key_len = 3`). Тут варто зазначити, що параметр глибини послідовності не доречно було б генерувати всередині функції-кодувальника. Оскільки, за відсутності інформації про ключі x_1, x_2, \dots, x_n які знаходяться лише в середині функції `code()`, тільки за умови відомого значення про глибину послідовності, ми можемо відтворити формулу рекурентного співвідношення, без знання якого – розшифрування повідомлення фактично неможливе.

Звісно, для криптоаналітика, у варіанті відсутності інформації про довжину, залишається тільки послідовний перебір значень, для знаходження глибини послідовності $n = 2, 3 \dots$). Однак, для довіреного адресата інформація про довжину ключа постає необхідністю. У звичайних умовах системи шифрування, з міркувань безпеки і забезпечення конфіденційності інформації що передається, такий ключ необхідно передавати лише санкціонованому користувачеві і лише по захищеним каналам зв'язку використовуючи систему закритого ключа, адже така система в рамках симетричного шифрування була створена саме для таких випадків, коли один і той самий ключ необхідно використати для шифрування та розшифрування інформації. Передати ключ на основі ЛРП можна задіявши технології угоди про ключ (`keyagreement`), через встановлення авторизованого TLS/SSH-сеансу і передачі ключа всередині нього, використання служб управління ключами, тощо.

Після отримання функцією вхідних даних, починається прямий перебір всіх можливих ключових значень утворюючи множину з ключів x_1, x_2, \dots, x_n розмахом у 2^n варіантів (рис. 2).

```

Вхідне повідомлення: Math
Зашифроване повідомлення: 01100011001111011100110100011010
Можливі комбінації ключа
[0, 0, 0]
[0, 0, 1]
[0, 1, 0]
[0, 1, 1]
[1, 0, 0]
[1, 0, 1]
[1, 1, 0]
[1, 1, 1]

```

Рис. 2. Перебір ключів глибини послідовності $n = 3$

Теоретично будь-який з цих варіантів ключів міг бути початковим значенням ЛРП яка утворила гамма-шифр, що був покладений в основу шифрування повідомлення. Зважаючи на це, під кожен варіант ключів формується відповідна послідовність (використовуючи рекурентне рівняння), довжина якої дорівнює бітовій довжині закодованого повідомлення (рис. 3).

В результаті, із кожною зі сформованих гам виконується операцію виняткової диз'юнкції із закодованим повідомленням. В цьому випадку, варто звернути увагу на перевагу операції XOR, оскільки вона володіє властивістю самозворотності (повторне застосування цієї операції з тим самим ключем відновлює початкові дані). Відповідно, алгоритм накладання гамма-вставок можна описати формулою 3:

$$(T \oplus \gamma) \oplus \gamma = T.$$

Де M – початкове повідомлення; γ – гамма шифр; \oplus – операція XOR.

Після проведення виняткової диз'юнкції із кожним елементом множини гамма-вставок, отримуємо наступну множину результатів ймовірного повідомлення. З отриманих 2^n варіантів тільки один результат

Висновки. Лінійне рекурентне співвідношення (рекурентне рівняння) функціонує на основі встановлення залежностей між членами невідомої послідовності та індексу. Поточний метод набув широкого застосування в аналізі алгоритмів, цифровій обробці сигналів, економіці, а в контексті криптографії нерідко використовується в рамках симетричного шифрування.

Отриманий методом гамування в основі якого задіяно лінійне рекурентне співвідношення, зашифрований текст є достатньо трудомістким для розкриття в тому випадку, якщо гама-шифр не містить повторюваних бітових послідовностей і змінюється випадковим чином для кожного зашифрованого слова. Якщо період гами перевищує довжину всього зашифрованого тексту і невідома жодна частина вихідного тексту, то шифр можна розкрити тільки прямим перебором множини ймовірних ключових значень (наприклад підібрати ключ використовуючи атаку типу «brute force») в цьому випадку криптостійкість визначається розміром ключа.

Те, на скільки утворена гама відповідає вимогам безпеки у більшості випадків залежить від початкових даних, на основі яких генерується лінійне рекурентне співвідношення. Адже максимальне значення періоду послідовності цілком залежить від глибини ЛРП та співвідношення, що її задає, а конкретні значення – від початкового стану послідовності.

Підвищити криптостійкість алгоритму можна шляхом об'єднання кількох різних лінійних рекурентних співвідношень в контексті LFSRs (LFSRs – Linear Feedback Shift Registers) та/або застосуванням нелінійних функцій в зворотному зв'язку регістра, нелінійної логіки і фільтрації вмісту регістра.

Симетричний алгоритм шифрування на основі лінійного рекурентного співвідношення допускає як програмну, так і апаратну реалізацію. З точки зору практичності, програмна реалізація допускає більшу гнучкість у використанні. Однак реалізація алгоритмів шифрування в основному кодї програми провокує чисельні безпекові ризики пов'язані здебільш із несанкціонованим доступом та питаннями конфіденційності повідомлення. Для вирішення такої проблеми доречно застосовувати практику вносу функцій шифрування та/або дешифрування в окремі модулі або бібліотеки, а також передавати захищений ключ використовуючи лише захищені канали.

Список використаних джерел:

1. Основи криптології : навч. посіб. / Галкін О. В., Шкільняк О. С. Київ : КНУ ім. Шевченка, 2023. 199 с.
2. Теорія алгоритмів : навч. посіб. / Арсенюк І. Р., Колодний В. В., Яровий А. А. Вінниця : ВНТУ, 2006. 150 с.
3. Проектування та аналіз обчислювальних алгоритмів: вступ до алгоритмів : навч. посіб. / Федорін І. В. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 116 с.
4. Прикладна криптологія : навч. посіб. / Палагін В. В., Палагіна А. О., Івченко О.В. Черкаси : ЧДТУ, 2023. 218 с.
5. Меркелов І. В. Огляд методів генерації лінійних псевдовипадкових послідовностей для псевдовипадкового переналаштування робочої частоти. *Universum. Електроніка та телекомунікації*. 2023. № 3. С. 127–132.
6. Технології захисту інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах: навч. посіб. Жилін А. В., Шаповал О. М., Успенський О. А. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 214 с.
7. Основи бездротових технологій / О. Г. Бедняк, Ю. В. Савченко, В. О. Воскобойник, А. В. Тіменко, Н. В. Кіцель, О. О. Шаповал. Кременчук : Видавництво «НОВАБУК», 2025. – 300 с.
8. V. O. Voskoboinyk, Iu. V. Savchenko, L. M. Karpukov, O. A. Parshyna, D. I. Prokopovych-Tkachenko. ASSESSMENT OF THE STATE OF INFORMATION SECURITY USING EXPERT SYSTEMS. *Системи та технології*, № 1 (67), 2024 DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-1-67.11>
9. Козіна Г. Л., Савченко Ю. В., Воскобойник В. О., Прокопович-Ткаченко Д. І. Математичний підхід до підвищення швидкодії програмної реалізації криптоалгоритму SM4. *Системи та технології*, № 2 (68), 2024 DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.9>
10. Karpukov L., Tarasenko Y., Voskoboinyk V., Savchenko I., Shapoval O. Modeling of Safe Object Detection by Near-Field and Nonlinear Radar Systems. In: Solovieva, V., Hushko, S. (eds) Sustainable Development in Economics, Technology and Environmental Engineering. ISC SAI 2023. Sustainable Economy and Ecotechnology. Springer, Cham. 2025. pp 363–369. https://doi.org/10.1007/978-3-031-91953-4_40
11. Воскобойник В. О., Савченко Ю. В., Семеренко П. О. Застосування штучного інтелекту у багатофакторній автентифікації. Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: XII Міжн. наук.-практ. конф., 10–12 грудня 2024 р. : тези доповідей. Запоріжжя, 2024. С. 237–240.
12. Тарасенко Ю. С., Савченко Ю. В. ГЕОРАДІОЛОКАЦІЙНІ АСПЕКТИ БЕЗПЕКИ ПРИПОВЕРХНЕВИХ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ. *Системи та технології*, 2023. 66 (2). С. 57–65. DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.2-66.7>
13. Тарасенко Ю. С., Савченко Ю. В. РИЗИК-ОРІЄНТОВАНІ ПРОЦЕСИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ. *Системи та технології*, 2023. 65 (1). С. 66–76. DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.1-65.9>

References:

1. Halkin, O. V., Shkil'nyak, O. S. (2023). *Osnovy kryptolohiyi [Fundamentals of cryptology]: navch. posib.* Kyiv : KNU im. Shevchenka, 199 s.
2. Arsenyuk, I. R., Kolodnyy, V. V., Yarovyy, A. A. (2006). *Teoriya alhorytmiv [Theory of algorithms]: navch. posib.* Vinnytsya : VNTU, 150 s.
3. Fedorin I. V. (2022). *Proektuvannya ta analiz obchyslyval'nykh alhorytmiv [Design and analysis of computational algorithms]: vstup do alhorytmiv : navch. posib.* Kyiv : KPI im. Ihorya Sikors'koho, 116 s.
4. Palahin, V. V., Palahina, A. O., Ivchenko, O. V. (2023). *Prykladna kryptolohiya [Applied cryptology]: navch. posib.* Cherkasy : CHDTU, 218 s.
5. Myerkyelov, I. V. (2023). *Ohlyad metodiv heneratsiyi liniynykh psevdovypadkovykh poslidovnostey dlya psevdovypadkovoho perenalashtuvannya robochoyi chastoty [Overview of methods for generating linear pseudorandom sequences for pseudorandom retuning of the operating frequency].* Universum. *Elektronika ta telekomunikatsiyi.* № 3. S. 127–132.
6. Zhylin, A. V., Shapoval, O. M., Uspens'kyi, O. A. (2020). *Tekhnolohiyi zakhystu informatsiyi v informatsiyno-telekomunikatsiynykh systemakh [Information protection technologies in information and telecommunication systems]: navch. posib.* Kyiv: KPI im. Ihorya Sikors'koho, 214 s.
7. Byednyak, O. H., Savchenko, Iu. V., Voskoboynyk, V. O., Timenko, A. V., Kitsel', N. V., Shapoval, O. O. (2025). *Osnovy bezdrovovykh tekhnolohiy [Wireless Technology Basics].* Kremenchuk : Vydavnytstvo "NOVABUK", 300 s.
8. Voskoboynyk, V. O., Savchenko, Iu. V., Karpukov, L. M., Parshyna, O. A., Prokopovych-Tkachenko, D. I. (2024). *ASSESSMENT OF THE STATE OF INFORMATION SECURITY USING EXPERT SYSTEMS.* *Systemy ta tekhnolohiyi,* № 1 (67), DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-1-67.11>
9. Kozina, H. L., Savchenko, Iu. V., Voskoboynyk, V. O., Prokopovych-Tkachenko, D. I. (2024). *Matematychnyy pidkhid do pidvyschennya shvydkodiyi prohramnoyi realizatsiyi kryptoalhorytmu SM4 [Mathematical approach to increasing the speed of software implementation of the SM4 crypto algorithm].* *Systemy ta tekhnolohiyi,* № 2 (68), DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.9>
10. Karpukov, L., Tarasenko, Y., Voskoboynyk, V., Savchenko, Iu., Shapoval, O. (2025). *Modeling of Safe Object Detection by Near-Field and Nonlinear Radar Systems.* In: Solovieva, V., Hushko, S. (eds) *Sustainable Development in Economics, Technology and Environmental Engineering. ISC SAI 2023. Sustainable Economy and Ecotechnology.* Springer, Cham. pp 363–369. https://doi.org/10.1007/978-3-031-91953-4_40
11. Voskoboynyk, V. O., Savchenko, Iu. V., Semerenko, P. O. (2024). *Zastosuvannya shtuchnoho intelektu u bahatofaktorniy avtentyfikatsiyi [Application of artificial intelligence in multi-factor authentication].* *Suchasni problemy i dosyahnennya v haluzi radiotekhniki, telekomunikatsiy ta informatsiynykh tekhnolohiy: XII Mizhn. nauk.-prakt. konf., 10–12 hrudnya 2024 r. : tezy dopovidey.– Zaporizhzhya, C. 237–240.*
12. Tarasenko YU. S., Savchenko Iu.V. (2023). *HEORADIOLOKATSIYNI ASPEKTY BEZPEKY PRYPOVERKHNEVYKH OB'YEKTIV KRYTYCHNOYI INFRASTRUKTURY [GEORADIOLOCATION ASPECTS OF SECURITY OF SURFACE OBJECTS OF CRITICAL INFRASTRUCTURE].* *Systemy ta tekhnolohiyi,* 66 (2). S. 57–65. DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.2-66.7>
13. Tarasenko Yu. S., Savchenko Iu.V. (2023). *RYZYK-ORIYENTOVANI PROTSESY ZABEZPECHENNYA BEZPEKY OB'YEKTIV KRYTYCHNOYI INFRASTRUKTURY [RISK-ORIENTED PROCESSES OF SECURITY OF CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS].* *Systemy ta tekhnolohiyi,* 65 (1). S. 66–76. DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.1-65.9>

Дата першого надходження статті до видання: 23.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

МЕНЕДЖМЕНТ

UDC 656.078:656.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2026-1-71.19>

Muzykin M. I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Transport Technologies and International Logistics
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0003-2938-7061

Nesterenko H. I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Transport Service and Logistics, Ukrainian State University of Science and Technologies
ORCID: 0000-0003-1629-0201

Bibik S. I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Transport Technologies and Transportation Process Management, National Transport University
ORCID: 0000-0002-5832-6949

Barkalova N. O., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Transport Service and Logistics, Ukrainian State University of Science and Technologies
ORCID: 0000-0002-9350-881X

LOGISTICS MANAGEMENT OF MOTOR VEHICLE TERMINAL OPERATIONS AS A QUEUING SYSTEM

The article analyzes calculating the motor vehicle terminal operations as a queuing system and determining the effectiveness of proposed methods for optimizing terminal operations based on logistic approaches. The research assesses the feasibility of implementing a control system at a humanitarian aid warehouse that would ensure the collection and storage of data on vehicle locations at loading areas, the status of loading and unloading mechanisms, and decision-making regarding their use, as well as to transmit commands to drivers to enhance the efficiency of road transport operations during humanitarian cargo delivery. The core principle of the terminal's operations is optimal logistics management of cargo flows. Goods are sorted by priority and destination, ensuring minimal delays and rapid delivery of humanitarian aid to those in need. Calculations have been made for the operation of the motor vehicle terminal as a queuing system, specifically focusing on vehicle downtime during unloading at the humanitarian warehouse. The effectiveness of the proposed terminal optimization methods based on logistic approaches was also evaluated. The vehicle idle time during cargo operations was determined for traditional technology and for the implementation of a regulation system for truck arrival at loading fronts. Furthermore, the annual cost savings achievable through the organization of an optimal regulation system for truck arrivals at terminal loading fronts were calculated. It is proposed to develop the integrated decision support within the terminal system's functional cycle as an automated system. The main objective of this method is to eliminate the 'human factor,' as automation is intended to enhance data quality, streamline the processing of cargo owner information, and optimize technological processes. The primary challenges for humanitarian aid terminals include ensuring cargo security, preventing delays, and maintaining operational responsiveness to changing conditions. At the same time, investments in advanced technologies and infrastructure improvements can significantly increase the operational efficiency of such terminals.

Key words: motor vehicle terminal, queuing system, loading front, humanitarian cargo, terminal system.



© M. I. Muzykin, H. I. Nesterenko, S. I. Bibik, N. O. Barkalova, 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Музикін М. І., Нестеренко Г. І., Бібік С. І., Баркалова Н. О. Логістичне управління роботою автомобільного терміналу як системи масового обслуговування

Статтю присвячено розрахунку роботи автомобільного терміналу як системи масового обслуговування та визначенню ефективності запропонованих методів оптимізації роботи терміналу на основі логістичних підходів. Дослідження спрямоване на визначення доцільності впровадження на складі гуманітарної допомоги системи контролю, яка б забезпечувала збір та збереження інформації про місцезнаходження автомобілів на вантажних ділянках, стан навантажувально-розвантажувальних механізмів та прийняття рішень щодо їхнього використання, а також передачу команд водіям з метою підвищення ефективності автотранспортних операцій при перевезенні гуманітарних вантажів. Основний принцип роботи терміналу базується на оптимальному логістичному управлінні потоками вантажів. Вантажі сортуються за пріоритетом та місцем призначення, що забезпечує мінімальні затримки та швидку доставку гуманітарної допомоги тим, хто її потребує. Проведено розрахунки роботи автомобільного терміналу як системи масового обслуговування та простій автомобілів під розвантаженням на складі гуманітарної допомоги. Також розраховано ефективність запропонованих методів оптимізації роботи терміналу на основі логістичних підходів. Встановлено простоту автомобілів під вантажними операціями при традиційній технології і при впровадженні системи регулювання підведення вантажних автомобілів до вантажних фронтів. Також розраховано річну економію, яку можливо досягти шляхом організації оптимальної системи регулювання підведення автомобілів до вантажних фронтів терміналу. Формування інтегрованої інформаційної підтримки прийняття рішення в функціональному циклі термінальної системи пропонується зробити у виді автоматизованої системи. Головною задачею цього методу є виключення «людського фактору», оскільки автоматизація має вдосконалити якість отриманої інформації, обробку інформації про вантажовласників та оптимізувати технологічні процеси. Основними викликами для терміналів гуманітарної допомоги є забезпечення безпеки вантажів, уникнення затримок та оперативне реагування на зміну умов. Водночас, інвестиції у новітні технології та покращення інфраструктури можуть значно підвищити ефективність роботи таких терміналів.

Ключові слова: автомобільний термінал, система масового обслуговування, вантажний фронт, гуманітарні вантажі, термінальна система.

Problem statement. With the onset of the Russian Federation's full-scale aggression, effective logistics has become a key factor in ensuring the timely delivery of food, medical supplies, clothing, and other vital resources to those who need them most.

Humanitarian aid motor vehicle terminals play a crucial role in delivering essential resources to crisis-affected areas. These terminals function as queuing system nodes, ensuring efficient and prompt distribution of cargo. They possess a complex structure, including zones for reception, storage, and dispatch of goods. Each zone is designed to handle specific types of cargo (food and non-food items), which allows for the optimization of loading and unloading processes.

Analysis of Recent Research and Publications. Having analyzed the research of scientists on this issue, we obtained the following. Article [2] analyzes the largest humanitarian crisis in Europe since the Second World War, which arose as a result of the full-scale military aggression launched in the territory of Ukraine in February 2022. The increase in the level of conflict led to a significant increase in humanitarian aid; however, supply and distribution face difficulties due to the destruction of transport and communication infrastructure. The article proposes the use of the ArcGIS system to develop a software product that will plot the optimal and safe route for humanitarian cargo delivery in real-time, avoid risks, and reduce human factor interference. The application of geographical data from various sources, such as GPS, aerospace, and satellite images, as well as information from local websites, will allow the creation of a map of the status situation and ensure effective humanitarian aid management. It also considers using the Hierarchy Analysis Method to define optimization criteria and select the optimal route. This approach considers partial criteria, such as route length, travel time, vehicle brand, and others, to determine new routes under military conflict conditions. The provided recommendations and methods make it possible to create an innovative tool for effective humanitarian aid management in military conflict conditions, ensuring the safety and efficiency of delivery in Ukraine. The development of such a tool will not only facilitate the supply of humanitarian aid but also help prevent threats to workers and aid recipients, contributing to the provision of necessary resources in an emergency.

The aim of the paper [3] is to analyze the current state of the humanitarian situation in Ukraine under military aggression and to develop ways to improve this situation by creating new and developing existing transport hubs located both on the western border of the country and in the central regions. In the research, the authors used methods of analysis and synthesis to study available information on the current state and trends in the further development of logistics and humanitarian hubs both on the western border and within the country. Aggregation and intelligent data analysis were used to identify promising directions for the development of the logistics network.

Results. The uncertain situation currently facing the operation of seaports compels the state to seek alternative routes for the export and import of raw materials and finished products. To address this issue, it is also advisable to develop a network of transport hubs near the western border. To date, 31 regional humanitarian aid hubs have been established in Ukraine. The leading regions include Zaporizhzhia with 5 hubs, followed by Kyiv and Ivano-Frankivsk with 2 hubs each. The remaining regions have 1 hub each. The number of hubs in border areas remains insufficient, especially considering the sharp change in the directions of main cargo flows –specifically, grain and metal. As of March 2022, the average daily demand for transportation towards the EU reached 8,000 wagons;

therefore, it is urgent to resolve the issue of developing both the existing bogie exchange system and additional transshipment infrastructure.

Scientific Novelty. The authors have aggregated and systematized information regarding the existing system of transport hubs to support current and future volumes of both humanitarian and industrial export-import cargo.

Practical Significance. The results obtained provide a scientific basis for the concept of creating and developing a system of humanitarian and logistics hubs to increase the efficiency of cargo flow movement.

Analysis of the key challenges in international transportation shows that establishing a rational delivery scheme is essential for resolving these issues and improving freight efficiency. Analysis of the selection criteria for a rational delivery scheme indicates that total delivery costs provide the most comprehensive measure of efficiency, while timeliness remains a critical factor in international transportation.

The article [4] discusses the topical issues of the transformation of logistics flows in wartime conditions in Ukraine. The classification of humanitarian aid goods, sources of their receipt are considered, and the monitoring of logistical problems that arose in the country with the beginning of the full-scale Russian invasion is carried out. The essence of the concept of humanitarian logistics and its main tasks are determined, the difficulties of working with humanitarian cargo are described, and ways to prevent untimely delivery of humanitarian cargo are proposed. It is noted that poorly established coordination between various participants in the logistics chain leads to a slowdown in the dispatch and delivery of humanitarian cargo. Attention is focused on the important role of domestic companies in the processes of delivering humanitarian cargo. Prospects for the restoration of logistics in the post-war period are outlined, which will allow Ukraine to integrate into the European system.

The article [5] analyzes the state of legal regulation in the transportation of humanitarian aid cargo and identifies vectors for improving the relevant legislation. It is emphasized that under martial law, the possibilities of the national economy to function are significantly limited, logistics chains within the country are disrupted. This has necessitated changes in established approaches to the organization and implementation of transport activities, the reorientation of the transport services market from commercial cargo transportation toward the transportation of humanitarian aid goods, the priority use of road transport for the transportation of goods due to restrictions on transportation by other modes of transport. It is emphasized that modern challenges require consideration at the legislative level. A comparative analysis of the general and simplified procedures for the import of humanitarian aid cargo into the territory of Ukraine is carried out. It is noted that under martial law, the transportation of humanitarian cargo has undergone gradual simplification at the legislative level. The stages of development of legislation in terms of simplifying the import of humanitarian aid cargo are highlighted. Attention is paid to the features of the transportation of humanitarian aid cargo by rail under martial law by JSC «Ukrzaliznytsia». It is concluded that the transportation of humanitarian cargo as a type of economic (foreign economic) activity is characterized by certain features: 1) a special (simplified in the conditions of martial law) procedure for customs clearance and customs control; 2) a special subject composition (direct participants: donors, recipients, purchasers, transport organizations (carriers); indirect participants (authorized state authorities, etc.); 3) a specific object of transportation (humanitarian aid goods). The features of the transportation of humanitarian cargo in the conditions of martial law are highlighted. The expediency of considering the features of concluding and executing contracts for the transportation of humanitarian cargo in the special transport legislation of Ukraine, in particular, the Rules for the Transportation of Cargo, is substantiated.

In [6], a concept for the creation and development of humanitarian hubs in Ukraine is presented. To reduce costs and reduce the time for putting such hubs into operation, it is advisable to locate them based on existing facilities – border railway stations, transshipment complexes, railway bogie interchange points, etc. In addition, it is necessary to develop a terminal network within the country in several echelons – strategic, tactical, and operational. When creating hubs of the two lower levels, close coordination between military and civilian administrations is mandatory, which has proven its effectiveness since 2014. Hubs created on the western border should be adapted to perform both a humanitarian function and to ensure export-import transportation of agricultural and industrial cargo. Even with the partial or complete restoration of seaports, transportation of goods by rail and road, both in the direction of Ukraine and in the opposite direction, to the countries of the European Union will remain relevant. Thus, the establishment and development of a logistics hub network is currently a top priority for Ukraine. However, implementing such large-scale infrastructure projects is impossible without attracting significant investment through public-private partnerships (PPP).

The paper [7] examines the main factors that influenced the change in logistics services in Ukraine. A special problem for logistics during this period is the road infrastructure. Stable logistics chains have been destroyed. Routes have become longer – it is necessary to bypass dangerous areas, and alternative roads are not adapted to the movement of oversized trucks. Without studying new logistics routes, it is quite difficult to predict the duration of delivery. The principle by which companies transporting humanitarian cargo operate is reduced to the following formula: there is a truck in which the necessary goods that must be delivered are required. Usually, the cargo does not occupy the entire cargo space, but only part of it, so it would be advisable to use several orders in parallel, which in turn will reduce fuel consumption due to its shortage, optimize costs, and reduce the number of trips by car, which are now quite dangerous due to broken roads and mined territories. It is also considered that the delivery of humanitarian goods

in international traffic has a number of features. Specifically, under current regulations, importing humanitarian aid requires only a single document – a declaration containing all necessary details regarding the consignor, consignee, and the goods. Additional innovations include the abolition of the restricted list of goods classified as humanitarian aid, the exemption of Ukrainian carriers from foreign road tolls, and streamlined border crossing procedures.

Given that deliveries directly to aid recipients consist of small-batch shipments, they must be executed rapidly between periods of shelling while maintaining maximum stealth to avoid enemy detection.

Study [10] proposes a classification of methods for solving small-batch cargo routing problems. These route-planning methods focus on identifying the shortest paths; however, they do not account for client prioritization or specific service strategies. Most often, vehicle routing tasks are carried out using simple and effective heuristic methods that allow you to quickly find the desired solution. However, it does not guarantee finding the optimal solution. Currently, methods are being developed that combine the flexibility of heuristics with the precision of linear programming models, enabling the achievement of optimal or, at the very least, provably better solutions [11].

In previous research [12] it was determined that the optimal strategy for servicing cargo owners in conditions of uncertainty with constantly changing demand is service by periods of the day, which leads to an increase in the quality of transport services and the formation of a flexible tariff policy of transport enterprises aimed at more fully meeting the requirements of cargo owners.

Reference [13] proposes a formalization of costs associated with small-batch cargo transportation. The research develops a model for selecting rational vehicle capacity in small-batch operations, depending on the average shipment size and the number of consignors served.

Reference [14] outlines a methodology for organizing international transportation. However, this approach does not account for transit time costs. The criteria lack a detailed description of the freight process and fail to consider potential customs delays.

The author's research [15] is aimed at improving the organization of the transportation of small-batch cargo by the method of forming delivery routes with variable demand for transportation. For this, the probabilistic nature of the demand for transportation is calculated, and attention is also paid to determining the number of arrivals. The parameters of the transport process are considered deterministic.

In [16], it is noted that any transportation process begins with identifying consumer demand for products. The accuracy of determining the batch size directly affects the time required to find a suitable vehicle, compliance with delivery deadlines, the maintenance of safety stocks at consumer warehouses, vehicle utilization efficiency, and overall storage costs.

The authors of research [17] discuss the method of terminal transportation, where the main task is to organize an effective cargo delivery system. The following methods were considered for comparing the terminal and end-to-end delivery schemes and forming an integrated information automated decision support system in the functional cycle of the terminal system.

The purpose of the article is to calculate the performance of a motor vehicle terminal as a queuing system and to determine the effectiveness of the proposed logistics-based optimization methods. The research aims to determine the feasibility of implementing a control system at a humanitarian aid warehouse that would ensure the collection and storage of information on vehicle locations in loading areas, the status of loading and unloading mechanisms, and decision-making regarding their utilization, as well as transmitting commands to drivers to enhance the efficiency of motor transport operations during humanitarian cargo delivery.

Statement of basic materials. Terminal transportation is conducted via dedicated terminals and is primarily used for **consolidated cargo**. An alternative technology is **through-delivery** (end-to-end), which involves transporting goods using a single vehicle without changing drivers. The effectiveness of the schemes is assessed by indicators: delivery speed, costs, and time. The main difference between the two schemes is the ability to consolidate small shipments due to cargo storage at the terminal, which smooths out irregularities in the terminal system, while through-delivery schemes do not have such an opportunity due to the short period of selection of the required amount of cargo. The formation of integrated information support for decision-making in the functional cycle of the terminal system is proposed to be done in the form of an automated system. The main task of this method is to eliminate the “human factor”, since automation should improve the quality of the information received, the processing of information about cargo owners, and optimize technological processes. It focuses on the automation of workstations for consignors, consignees, motor transport dispatchers, and logistics center operators, all of which are integrated with a modeling unit and a decision-making module. The primary disadvantage of the integrated decision support method is the high cost of technology implementation, whereas the main drawback of terminal transportation schemes is the significant time consumption.

The main principle of the terminal operation is based on optimal management of cargo flows. Cargo is sorted by priority and destination, which ensures minimal delays and rapid delivery of humanitarian aid to those who need it.

For the effective operation of terminals, modern technologies are used, such as warehouse management systems (WMS), automated cargo sorting and tracking systems. This allows to increase in the accuracy and speed of cargo processing.

The main challenges for humanitarian aid terminals are ensuring cargo safety, avoiding delays, and responding promptly to changing conditions. At the same time, investments in the latest technologies and infrastructure improvements can significantly increase the efficiency of such terminals.

Calculating the service indicators of a multi-channel queuing system (QS). [14]

Converting the request flow intensity per hour:

$$\lambda = \frac{N}{24}. \quad (1)$$

Service flow intensity:

$$\mu = \frac{t}{n}. \quad (2)$$

Load intensity

$$\rho = \lambda \cdot t_{обс}. \quad (3)$$

Load intensity shows the degree of consistency between the incoming and outgoing request flows of the service channel and determines the stability of the queuing system.

Probability that the channel is free (proportion of channel downtime)

$$p_0 = \frac{1}{\sum \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)} \left(1 - \left(\frac{\rho}{n}\right)^m\right)}. \quad (4)$$

Probability that the channel is under service:

$$p_n = \frac{\rho^n}{n!} p_0. \quad (5)$$

Probability of failure (probability that the channel is busy) (portion of requests that were rejected).

$$p_{відм} = \frac{\rho^{n+m}}{n^m \cdot n!} \cdot p_0 \quad (6)$$

Probability of requesting service (probability that the client will be served).

In systems with failures, failure and service events form a complete group of events; therefore:

$$p_{відм} + p_{обс} = 1. \quad (7)$$

Relative throughput:

$$Q = p_{обс}. \quad (8)$$

Average number of channels busy with service (average number of busy channels).

$$p_{обс} = 1 - p_{відм}. \quad (9)$$

Average number of channels busy with service (average number of busy channels).

$$n_3 = \rho \cdot p_{обс}. \quad (10)$$

Average number of idle channels.

$$n_{np} = n - n_3. \quad (11)$$

The channel utilization factor.

$$K_3 = \frac{n_3}{n}. \quad (12)$$

Absolute throughput (Intensity of the outgoing flow of serviced requests).

$$A = p_{обс} \cdot \lambda. \quad (13)$$

Average idle time of the QS (per hour).

$$t_{np} = p_{відм} \cdot t_{обсл}. \quad (14)$$

Average channel idle time (per hour).

$$t_{np,к} = \frac{t_{обсл} \cdot (1 - p_{відм})}{p_{відм}}. \quad (15)$$

Probability of queue formation.

$$P_{\text{чепзу}} = \frac{\rho^n}{n!} \cdot \frac{1 - \left(\frac{\rho}{n}\right)^m}{1 - \frac{\rho}{n}} \cdot P_0. \quad (16)$$

Average number of requests in the queue.

$$L_{\text{чепзу}} = \frac{\rho^{n+1} \cdot \left(\frac{\rho}{n}\right)^m \cdot \left(m + 1 - m \cdot \frac{\rho}{n}\right)}{n \cdot n! \cdot \left(1 - \left(\frac{\rho}{n}\right)\right)^2} \cdot P_0. \quad (17)$$

Average idle time of the QS (the average waiting time of a request in the queue).

$$T_{\text{просм}} = \frac{L_{\text{чепзу}}}{A}. \quad (18)$$

Average number of requests being served.

$$L_{\text{обсл}} = \rho \cdot Q. \quad (19)$$

Average number of requests in the system (i.e., requests are already being served and those waiting in the queue).

$$L_{\text{СМО}} = L_{\text{чепзу}} + L_{\text{обсл}}. \quad (20)$$

The average time a request spends in the QS.

$$T_{\text{СМО}} = \frac{L_{\text{СМО}}}{A}. \quad (21)$$

The calculation results are given in Table 1.

Table 1

Results of QS calculations.

No.	Indicator	Indicator	Value
1	Request flow intensity per hour, cars/hour	λ	2.2
2	Service flow intensity	μ	2.143
3	Load intensity	ρ	1.027
4	Probability that the channel is free	P_0	0.327
5	Probability of failure	P_{fail}	0.00614
6	Average number of channels busy with service	n_b	0.815
7	Average number of idle channels	n_{idle}	1.02
8	The channel utilization factor	K_u	0.5
9	Absolute throughput	A	2.187
10	Average idle time of the QS	t_{idle}	0.00286
11	Average idle time of the channel	$T_{\text{id.c}}$	347.086
12	Probability of queue formation	P_{queue}	0.341
13	Average number of requests in the queue	L_{queue}	0.327
14	Average idle time of the QS	T_{idle}	0.15
15	Average number of requests being served	L_{serv}	1.02
16	Average time a request spends in the QS	T_{QS}	0.616

The purpose of this part in the research is to determine the feasibility of implementing a control system at a humanitarian aid warehouse that would ensure the collection and storage of information on vehicle locations in loading areas, the status of loading and unloading mechanisms, and decision-making regarding their utilization, as well as transmitting commands to drivers to enhance the efficiency of motor transport operations during humanitarian cargo delivery. Unloading at the humanitarian aid warehouse is carried out by two teams in two sections of the warehouse. Motor transport operates for 72 hours. According to the results of statistical research, the arrival of vehicles at the warehouse is

a random process following the Poisson distribution with an intensity of 2.2 vehicles/hour. The vehicle service time at the warehouse section is normally distributed with a mean of 28 minutes and a standard deviation of 6 minutes.

The capital investment required to implement the control system amounts to 5,000 c.u. (conditional units), while additional annual operating costs are 4,000 c.u. The absence of such a system leads to situations where vehicles remain idle at some loading areas while others remain free. Implementing the control system will reduce unproductive vehicle downtime and increase the productivity of loading areas. However, as the implementation requires additional expenditures, the feasibility of transitioning to the new technology must be determined through a technical and economic analysis.

$$C_a + E_n \cdot K_a \leq \Delta C + E_n \cdot \Delta K_a, \quad (22)$$

where C_a, K_a – operating costs and capital investments required to implement a system for regulating the delivery of vehicles to the loading fronts; ΔC – operating costs savings in the “motor transport – cargo front – warehouse” system:

$$\Delta C = 365 \cdot e_{a-z} \cdot \Delta T_a, \quad (23)$$

e_{a-z} – the cost of one vehicle-hour; ΔT_a – the reduction in vehicle downtime per day as a result of regulating vehicle arrivals; ΔK_a – capital investment in rolling stock.

To calculate the parameters included in formula (22), it is necessary to establish the idle times of vehicles during cargo operations using traditional technology and the implementation of a control system. Given the probabilistic nature of transport processes, this can be done as completely as possible using the simulation modeling method.

First, let us establish the random nature of the flow of vehicles arriving at the cargo fronts.

If the flow intensity is described by a Poisson distribution, then the intervals between arriving vehicles are described by the dependence

$$P(I > I_a) = e^{-\lambda_a I_a} \quad \text{or} \quad P(I \leq I_a) = 1 - e^{-\lambda_a I_a}, \quad I_a = -\frac{1}{\lambda_a} \ln R_i, \quad (24)$$

where R_i are random numbers with their uniform distribution in the interval from 0 to 1; I_i is the interval between consecutively arriving vehicles.

Now, let us simulate the intervals between vehicles in the following sequence.

1. We obtain R uniformly distributed random numbers in the interval from 0 to 1. The number of interval simulations

$$R \geq \frac{x^2}{4\varepsilon^2}, \quad (25)$$

where x is a value taken from the table of probability integral values depending on the value of P : $x = 1.96$ at $P = 0.95$; ε is a permissible error.

2. Using expression (24) and the extracted random numbers, we determine the intervals between the vehicles. For example, the interval between the first and second vehicles:

$$\begin{aligned} I_{12} &= -\frac{24}{2,2} \cdot \ln(0,227) = 40 \text{ min;} \\ I_{23} &= -\frac{24}{2,2} \cdot \ln(0,176) = 47 \text{ min;} \\ I_{34} &= -\frac{24}{2,2} \cdot \ln(0,252) = 37 \text{ min.} \end{aligned}$$

We will determine the duration of the cargo operation using arbitrarily defined normal random deviations.

Previously, it was assumed that the driver selects a warehouse section at random. The process of selecting a warehouse section is simulated using a table of random numbers. If there are two sections in the warehouse and the random number falls within the interval from 0 to 0.5, then the vehicle is directed to the first section, if in the interval from 0.5 to 1.0, then to the second one.

Similarly, we simulate the structure of the vehicle fleet that performs the pickup (delivery) of cargo from the warehouse.

With the regulated vehicle delivery, each subsequent vehicle arrives at the cargo front that is free from service, or at the one where the vehicle service ends earlier than the others.

With different disciplines of the driver's choice of the warehouse and a normal distribution of fluctuations in the duration of the cargo operation, the simulation results obtained are given in Table 2.

Analysis of the data obtained in Table 2 allows us to draw the following conclusions:

1. Minimal idle time of vehicles ensures optimal regulation of their delivery to the cargo fronts.
2. The second most effective control procedure is the sequential passage of arriving vehicles to the warehouse sections.

Using the data of Table 5.2 and assuming the cost of 1 vehicle-hour equal to 4 UAH, the annual savings in operating costs in the «motor transport – cargo front – warehouse» system with optimal regulation in the delivery of vehicles to the warehouse will be:

$$\Delta C = 365 \cdot 4 \left(\frac{1514 - 360}{60} \right) = 28\,080.$$

As a result of reducing the idle time of vehicles at the cargo fronts, capital investments for the purchase of vehicles are eliminated:

$$\Delta K_a = \frac{\Delta \Sigma MH}{t_p} C_a, \quad (26)$$

$\Delta \Sigma MH$ – daily savings, vehicle-hours; t_p – average duration of vehicle operation during the day, hours; C_a – cost of the vehicle, c.u.; for example, for a DAF FX105 vehicle, 672 thousand UAH.

Savings in capital investments for the purchase of vehicles:

$$\Delta K_a = \frac{(1514 - 360) \cdot 672\,000}{60 \cdot 12} = 1\,077\,066.$$

Substituting the calculated data into formula (4.1), we find:

$$164\,000 + 0,125 \cdot 205\,000 < 28\,080 + 0,125 \cdot 1\,077\,066;$$

$$189\,625 < 192\,731,25.$$

Table 2

Simulation results.

Discipline of warehouse selection	Number of serviced vehicles, pcs.	Waiting time for service, min	Vehicle downtime while waiting for service, vehicles, min.
Random selection	188	11.08	4542
Sequential selection	188	6.27	1311
Optimal regulation	188	5.19	1080

Thus, at the selected warehouse, it is effective to use both sequential selection (in the form of a traffic light) and optimal regulation (using a dispatcher).

The approach of vehicles to the warehouse sections can be regulated by a dispatcher. The effect of dispatching:

$$\Delta C = 365 \cdot 4 \cdot \left(\frac{1514 - 360}{60} \right) + 0,125 \cdot \frac{672\,000 \cdot (1514 - 360)}{60 \cdot 12} = 162\,713,3.$$

Conclusions. Calculations were made for the motor vehicle terminal operations as a queuing system and for vehicle idle time during unloading at the humanitarian aid warehouse. The efficiency of the proposed methods for optimizing the terminal's operation based on logistics approaches was also calculated. This includes the creation of sequential regulation (installing a traffic light system to distribute vehicles among service channels). Based on the obtained calculations, we can conclude that organizing an optimal system for regulating the delivery of vehicles to the cargo fronts makes it possible to achieve annual savings of 162,713.3 UAH. Therefore, the sequential vehicle routing procedure is highly effective, as its implementation at this cargo front does not require additional capital or operating costs.

Bibliography:

1. Публікації – UNHCR Україна. *UNHCR Україна*. URL: <https://www.unhcr.org/ua/publications> (дата звернення: 15.10.2025).
2. Помазков М. В. Моделювання інтелектуальних маршрутів перевезення гуманітарних вантажів в умовах воєнного часу. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2023. № 41 С. 46–53.
3. The concept of forming and developing humanitarian hubs in ukraine during military aggression / А. Okorokov та ін. *Transport systems and transportation technologies*. 2022. № 23. С. 38. URL: <https://doi.org/10.15802/tst2022/261650> (дата звернення: 15.10.2025).
4. Гринів Н. Гуманітарна логістика як інструмент трансформації логістичних потоків в умовах воєнного часу. *Економіка та суспільство*. 2023. № 56. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-4> (дата звернення: 15.10.2025).
5. Деркач Е. М. Правові питання перевезення вантажів гуманітарної допомоги в умовах воєнного стану. *Аналітично-порівняльне правознавство*. ДВНЗ «УжНУ» Ужгород, 2022. № 1. С. 82–86

-
6. Nesterenko H. I., Muzykin M. I., Bibik S. I., Strelko O. H., Aleksieieva A. O. Analysis of organizing the delivery of humanitarian aid in crisis situations. *Системи та технології*. № 2 (68). 2024. С. 130–139.
 7. Жураковська Т. Особливості перевезення гуманітарних вантажів в умовах воєнного стану на території України. *Раціональне використання енергії в техніці* : зб. тез доп., м. Київ, 17 трав. 2022 р. Київ, 2022. С. 161–163.
 8. Самойленко М., Кобець А. Інформаційні технології в розв'язанні транспортних задач : Монографія. Харків : ХНАМГ, 2011. 256 с.
 9. Тюріна Н. М. Логістика: Навч. посіб. Київ. «Центр навчальної літератури», 2015. 392 с.
 10. Шраменко Н. Ю. Методи маршрутизації при дрібнопартійних перевезеннях в транспортних системах міст та шляхи їх удосконалення. *Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб.* 2009. № 86. С. 364–367.
 11. Лучко М. І. Удосконалення транспортного обслуговування збірних та розвізних маршрутів у логістичному ланцюгу постачань. *Вісник СНУ ім. В. Даля: науковий журнал* 2010. № 4, Ч. 2. С. 120–126.
 12. Шраменко Н. Ю. Вибір оптимальної стратегії обслуговування вантажовласників на розвізних маршрутах. *Вісник ХНАДУ: зб. наук. пр.* 2009. Вип. 44. С. 78–82.
 13. Шраменко Н. Модель вибору раціональної вантажності автомобілів при організації перевезень дрібнопартійних вантажів. *Вісник ХНАДУ*. 2015. № 68. С. 113–117.
 14. Смирнов І. Г., Косарева Т. В. Транспортна логістика: навчальний посібник. К. : Центр навчальної літератури, 2022. 224 с.
 15. Кунда Н.Т., Панченко Ю.В. Оцінка доцільності застосування термінальних перевезень за часовими характеристиками. *Вісник Національного транспортного університету*. К. : НТУ, 2013. Вип. 28. с. 257–266.
 16. Шраменко Н. Ю. Теоретико-методологічні основи ефективного функціонування термінальних систем при доставці дрібнопартійних вантажів: монографія. Харків : ХНАДУ, 2010. 156 с.
 17. Нагорний Є. В., Шраменко Н. Ю. Комерційна робота на транспорті: Підручник. Харків : ХНАДУ, 2012. 298 с.
 18. Транспортна задача. навч. посіб. для студ. спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення», спеціалізації «Програмне забезпечення розподілених систем», «Програмне забезпечення Web-технологій та мобільних пристроїв». КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О. К. Молодід. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 37 с.
 19. Нестеренко Г. І., Музикін М. І., Бібік С. І. Теорія оцінки безпеки руху як відсутність ризиків неприпустимого рівня. *Інжиніринг криз та ризиків транспортних послуг* : зб. доп. Міжнар. наук.-метод. конф., Маріуполь, 20–21 січ. 2021 р. Маріуполь, 2021. С. 296–298.
 20. Нестеренко Г. І., Музикін М. І., Бібік С. І. Аналіз впливу людського фактору на виникнення транспортних ризиків. *Інжиніринг криз та ризиків транспортних послуг* : зб. доп. Міжнар. наук.-метод. конф., Маріуполь, 20–21 січ. 2021 р. Маріуполь, 2021. С. 299–303.
 21. Музикін М. І., Попов Г. В., Біляченко М. В. Дослідження аварій з транспортними одиницями з використанням ризико-орієнтованого підходу. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 34-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»* (Харків, 29.10.2021). Х. : УкрДУЗТ, 2021. С. 45-46.
 22. Нестеренко Г. І., Музикін М. І., Стрелко О. Г., Оксенюк І. Підвищення ефективності транспортно-складської діяльності підприємства. 3-я міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології», Харків, 22–23 листопада 2022 р.: Тези доповідей. – Харків : УкрДУЗТ, 2022. С. 49–51.
 23. Бех П. В., Нестеренко Г. І., Стрелко О. Г., Музикін М. І. Управління вантажними перевезеннями в умовах ризиків конкурентного середовища. *Системи та технології*. 2021. № 1 (61). С. 85–97.
 24. Музикін М. І., Телуєва В. С. Організація роботи транспортного терміналу з обробки гуманітарних вантажів. *Економіко-правові та управлінсько-технологічні виміри сьогодення : молодіжний погляд* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції : у 3 т. Т. 3 (м. Дніпро, 03.11.2023). Дніпро : УМСФ, 2023. С. 381–383.
 25. Нестеренко Г. І., Бібік С. І., Музикін М. І., Буряк А. С. Організація роботи транспортного хабу з обробки гуманітарних вантажів. *Збірник наукових праць II Міжнародної науково-практичної конференції «Транспорт: наука та практика»* (Київ-Одеса, 25.05–26.05.2023): Київ : СНУ імені В. Даля, 2023. С. 75–78.
 26. Музикін М. І., Буряк А.С. Шляхи підвищення ефективності перевезень гуманітарних вантажів автомобільним транспортом.. *Економіко-правові та управлінсько-технологічні виміри сьогодення: молодіжний погляд*. Дніпро. УМСФ. 2024.

References:

1. Publications – UNHCR Ukraine. UNHCR Ukraine. (2024). Retrieved from: <https://www.unhcr.org/ua/publications> (Accessed on 15.10.2025).
2. Pomazkov M. V. (2023). Modeling of intellectual routes for transporting humanitarian cargo in wartime conditions. *Podolskyi visnyk: agriculture, technology, economics*. No. 41, pp. 46–53.

-
3. Okorokov, A., Vernyhora, R., Okorokova, Y., & Chernova, O. (2022). The concept of forming and developing humanitarian hubs in Ukraine during military aggression. *Transport Systems and Transportation Technologies*, (23), 38. <https://doi.org/10.15802/tstt2022/261650> (Accessed on 15.10.2025).
 4. Hryniv, N. (2023). Humanitarian logistics as a tool for transforming logistics flows in wartime conditions. *Economy and Society*, (56). URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-4> (Accessed on 15.10.2025).
 5. Derkach, E. M. (2022). Legal issues of transportation of humanitarian aid cargoes under martial law. *Analytical and comparative law*. No. 1. pp. 82–86.
 6. Nesterenko, H. I., Muzykin, M. I., Bibik, S. I., Strelko O. H., & Aleksieieva A. O. (2024). Analysis of organizing the delivery of humanitarian aid in crisis situations. *Systems and Technologies*, 2 (68), 130–139.
 7. Zhurakovska, T. (2022). Peculiarities of transportation of humanitarian cargoes under martial law in the territory of Ukraine. *Rational use of energy in technology: Collection of abstracts*. Kyiv, 2022. Pp. 161–163.
 8. Samoilenko, M., & Kobets, A. (2011). Information technologies in solving transport problems: monograph. Kharkiv : KhNAUE. 256 p.
 9. Tyurina, N. M. (2015). Logistics: teaching guide. Kyiv : Center for Educational Literature. 392 p.
 10. Shramenko, N. Yu. (2009). Routing methods for small-batch transportation in urban transport systems and ways to improve them. *Municipal economy of cities: scientific-technical collection*. No. 86, pp. 364–367.
 11. Luchko, M. I. (2010). Improvement of transport services of groupage and delivery routes in the logistics supply chain. *Bulletin of the V. Dahl SNU: scientific journal*. No. 4, Part 2. Pp. 120–126.
 12. Shramenko, N. Yu. (2009). Choosing the optimal strategy for servicing cargo owners on delivery routes. *Bulletin of the KhNADU: collection of scientific works*. (44), 78–82.
 13. Shramenko, N. (2015). Model for choosing the rational load capacity of vehicles when organizing the transportation of small-batch cargo. *Bulletin of the KhNADU*. (68), 113–117.
 14. Smirnov, I. G. & Kosareva, T. V. Transport logistics: a textbook. Kyiv : Center for Educational Literature, 2022. 224 p.
 15. Kunda, N. T. & Panchenko, Y. V. (2013). Assessment of the feasibility of using terminal transportation based on time characteristics. *Bulletin of the National Transport University*. (28), 257–266.
 16. Shramenko, N. Yu. (2010). Theoretical and methodological foundations of effective functioning of terminal systems for delivery of small-batch cargoes: monograph. Kharkiv : KhNADU. 156 p.
 17. Nagorny, E. V. & Shramenko, N. Yu. (2012). Commercial work in transport: Textbook. Kharkiv : KhNADU. 298 p.
 18. Molodid O. K. (2018). Transport task: teaching guide for students of specialty 121 “Software Engineering”, specializations “Software of distributed systems”, “Software of Web technologies and mobile devices”. Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. 37 p.
 19. Nesterenko, G. I., Muzykin, M. I. & Bibik, S. I. (2021). Theory of traffic safety assessment as the absence of unacceptable risks. *Engineering of crises and risks of transport services: collection of abstracts of the International Scientific and Methodological Conference*. Pp. 296–298.
 20. Nesterenko, G. I., Muzykin, M. I., & Bibik, S. I. (2021). Analysis of the influence of the human factor on the occurrence of transport risks. *Engineering of crises and risks of transport services: collection of abstracts of the International Scientific and Methodological Conference*. Pp. 299–303.
 21. Muzykin, M. I., Popov, G. V. & Bilyachenko M. V. (2021). Research of accidents with transport units using a risk-based approach. *Information and Control Systems in Railway Transport : Abstracts of poster presentations and speeches of participants of the 34th International Scientific and Practical Conference*. Kharkiv : UkrDUZT, 45–46.
 22. Nesterenko, G. I., Muzykin, M. I., Strelko, O. G. & Oksenyuk I. (2022). Increasing the efficiency of the transport and warehouse activities of the enterprise. *Intelligent Transport Technologies : 3rd International Scientific and Technical Conference*. Kharkiv : UkrDUZT, 49–51.
 23. Bekh, P. V., Nesterenko, H. I., Strelko, O. H., & Muzykin, M. I. (2021). Freight transportation management in conditions of competitive environment risks. *Systems and Technologies*, 1 (61), 85–97.
 24. Muzykin, M. I. & Telueva, V. S. (2023). Organization of work of the transport terminal for processing humanitarian cargo. *Economic, legal and managerial and technological dimensions of the present: youth perspective: materials of the International Scientific and Practical Conference: in 3 volumes*. Vol. 3. Dnipro : UMSF, 381–383.
 25. Nesterenko, G. I., Bibik, S. I., Muzykin, M. I. & Buryak, A. S. (2023), Organization of the work of the transport hub for the processing of humanitarian cargo. *Transport: Science and Practice : Collection of scientific papers of the II International Scientific and Practical Conference*. Kyiv : V. Dahl SNU, 75–78.
 26. Muzykin, M. I., & Buryak, A. S. (2024). Ways to improve the efficiency of transportation of humanitarian cargo by road. *Economic, legal and managerial and technological dimensions of the present: a youth perspective: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference: in 2 volumes*. Vol. 2. Dnipro : UMSF, pp. 440–442.
-

УДК 504.06:614.8:355.01(477)

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2026-1-71.20>

Перкун І. В., кандидат технічних наук,
доцент Івано-Франківського національного технічного
університету нафти і газу
ORCID: 0000-0002-6523-1606

Погребняк В. Г., доктор технічних наук,
професор Івано-Франківського національного технічного
університету нафти і газу
ORCID: 0000-0002-6523-1606

Вишнікіна О. В., кандидат хімічних наук,
доцент Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-3747-2904

Погребняк А. В., доктор технічних наук,
професор Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0003-3214-6410

ПРИНЦИПИ ІНТЕГРАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНОГО НОРМУВАННЯ ТА СТАНДАРТІВ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ В СТРАТЕГІЇ ПОСТКОНФЛІКТНОГО ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ

Питання забезпечення екологічної безпеки в Україні набуло критичного значення через широкомасштабну воєнну агресію, що спричинила унікальну синергію військових та техногенних загроз. Існуюча статична система екологічного нормування ГДК, ГДВ виявилася нездатною ефективно реагувати на непередбачувані, масовані викиди високотоксичних речовин, а також інтегруватися в механізми Цивільного захисту (ЦЗ). Це створює довгостроковий «екологічний борг» та відкладену небезпеку для здоров'я населення.

Мета. Обґрунтування та формулювання науково-методологічних принципів інтеграції екологічного нормування та стандартів безпеки життєдіяльності для розробки національної стратегії постконфліктного відновлення України.

Методологія. Використано системний підхід, методи ризик-аналізу та концепцію соціоекосистеми. Особливу увагу приділено методології адаптивного нормування із залученням технологій Штучного Інтелекту (ШІ) для прогнозування та управління мультимедійним ефектом забруднень.

Результати. Дослідження ідентифікує дві ключові прогалини у чинній системі: відсутність механізмів Тимчасового аварійного нормування ГДК-АВАРІЯ та нездатність враховувати сукупний, мультимедійний ефект забруднень. Для подолання цих викликів сформульовано чотири ключові принципи інтеграції: 1) Принцип пріоритету екологічної безпеки Zero Risk, що вимагає посилення нормативів для відновлюваних територій; 2) Принцип територіальної диференціації нормативів для створення адаптивних зон; 3) Принцип інтегрованого моніторингу для об'єднання даних екологічного контролю та ЦЗ в реальному часі; 4) Принцип «Зеленої» рекультивациі, що встановлює норми для безпечного поводження з відходами руйнування ООР.

Практичне значення. Запропоновані принципи є методологічною основою для законодавчих ініціатив, а саме формалізація ГДК-АВАРІЯ та практичних рішень на рівні органів місцевого самоврядування, включаючи впровадження ГІС-платформ та ШІ для динамічного управління екологічними ризиками. Це забезпечить перехід від реактивного контролю до проактивної, превентивної системи безпеки життєдіяльності, що відповідає європейським стандартам «зеленого» відновлення.

Ключові слова: екологічне нормування, цивільний захист, постконфліктне відновлення, екологічна безпека, адаптивне управління, соціоекосистема, штучний інтелект, «зелена» рекультивациія.

Perkun I. V., Pogrebnyak V. G., Vyshnikina O. V., Pogrebnyak A. V. Principles of Integrating Ecological Standardization and Life Safety Standards into Ukraine's Post-Conflict Recovery Strategies

issue of ensuring ecological security in Ukraine has acquired critical and unprecedented importance due to the full-scale military aggression, which has triggered a unique and dangerous synergy of military, chemical, and technogenic threats. The current, largely static system of environmental regulation, relying predominantly on fixed Maximum Permissible Concentration (MPC) and Maximum Permissible Discharge (MPD) standards, has proven fundamentally incapable of effectively responding to unpredictable, massive, and acute releases of highly toxic substances resulting from kinetic warfare. Furthermore, the existing



© І. В. Перкун, В. Г. Погребняк, О. В. Вишнікіна, А. В. Погребняк, 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

normative framework lacks the flexibility and legal mechanisms required for seamless integration into Civil Protection (CP) and disaster management response protocols. This systemic inadequacy creates a vast, long-term “ecological debt” for the nation and a postponed, latent danger to public health and the sustainability of natural ecosystems. Addressing this vulnerability necessitates a complete paradigm shift in environmental governance.

Goal. The primary objective of this research is to scientifically substantiate and formulate a set of crucial methodological principles for integrating adaptive ecological standardization with core life safety standards. These principles are intended to serve as the foundational scientific and regulatory basis for the development of a coherent, resilient national strategy for the post-conflict reconstruction and «green» recovery of Ukraine. The goal extends beyond simple cleanup to establishing a preventative, forward-looking environmental security system.

Methodology. The methodological framework employs a robust, multi-faceted approach. It relies on the Systemic Approach to analyze the complex interdependencies between military-induced environmental damage, public health, and socio-economic restoration efforts. Crucial to this is the application of Risk Analysis Methods to quantify both the immediate and latent hazards posed by war-related contaminants (e.g., heavy metals, unexploded ordnance residues, asbestos). The research adopts the Socio-Ecosystem Concept to understand how damage to natural capital directly compromises human and societal resilience. A central pillar of the methodology is the development of Adaptive Regulation – a dynamic normative framework – leveraging Artificial Intelligence (AI) and Geographic Information Systems technologies for the rapid, real-time forecasting and management of multimedia pollutant effects across various environmental compartments.

Results. The investigation critically identifies two fundamental, interrelated gaps within the current ecological standardization system that hinder effective post-conflict management: 1) Absence of Temporary Emergency Regulation (MPC-EMERGENCY): The lack of formalized, temporary, context-specific normative standards (referred to here as MPC-EMERGENCY) applicable immediately following catastrophic military or man-made events to guide emergency remediation and immediate safety measures. 2) Inability to Account for Cumulative, Multimedia Effects: The existing standards fail to adequately model and regulate the cumulative, synergistic effects of multiple pollutants simultaneously affecting different environmental media (air, soil, water), which is a characteristic feature of war damage.

Key words: ecological standardization, civil protection, post-conflict recovery, environmental safety, adaptive management, socio-ecosystem, artificial intelligence, “green” recultivation.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку України, що характеризується широкомасштабною воєнною агресією, проблема забезпечення екологічної безпеки набула критичного значення. Традиційні екологічні виклики, пов’язані з антропогенним навантаженням: викиди, скиди, утворення відходів [1], багаторазово посилюються і модифікуються внаслідок бойових дій [2–5]. Виникає унікальна і небезпечна синергія воєнних та техногенних загроз: цілеспрямовані обстріли критичної інфраструктури (хімічних заводів, нафтобаз, очисних споруд, гідротехнічних об’єктів) призводять до неконтрольованих викидів високотоксичних речовин, руйнування ґрунтового покриву та водної мережі.

Цей «подвійний удар» створює довгострокові ризики для соціоекосистем [6], які виходять за рамки звичайних надзвичайних ситуацій. Наслідки не обмежуються короточасним забрудненням; вони формують екологічний борг, який майбутні покоління будуть змушені сплачувати роками [7].

У цих умовах традиційна система екологічного нормування, встановлення гранично допустимих концентрацій та викидів, розроблена для мирного часу та планового антропогенного впливу, виявляється недостатньою [3, 5, 10, 11]. Вона не може оперативного реагувати на непередбачувані, масовані та високотоксичні викиди, спричинені військовою діяльністю, і не має чітких механізмів інтеграції в систему Цивільного захисту (ЦЗ) на етапі відновлення [10, 11]. Постає гостра необхідність переходу від реактивного контролю забруднення до превентивного, інтегрованого нормування, яке має стати основою для стратегій постконфліктного відновлення України. Це питання є ключовим для гарантування безпеки життєдіяльності та здоров’я населення [3].

Аналіз останніх досліджень. Проблематика екологічної безпеки у військових конфліктах активно досліджується у світі, зокрема в контексті досвіду Балкан, Близького Сходу та Чорнобильської катастрофи. Наукові праці зосереджуються на таких аспектах як оцінка військового забруднення [7], нормативи для військових операцій [12], токсикологічний вплив боєприпасів та вибухових речовин на ґрунти та води [2]. В Україні провідні вчені досліджують загальні питання екологічної безпеки та функціонування ЦЗ у надзвичайних ситуаціях [3, 6, 8, 9, 11].

Проте залишається недостатньо розробленим питання саме інтеграції двох систем, а саме бракує методології динамічного, адаптивного нормування, яке б оперативного враховувало синергію впливів наприклад сукупний вплив вибухових речовин та розлитих нафтопродуктів [4] і могло бути інкорпороване в протоколи реагування ЦЗ та практично відсутні чіткі принципи використання екологічних нормативів як інструменту стратегічного планування при відновленні, а не лише як основи для накладення штрафів [13].

Ці дослідження має на меті заповнити цю методологічну прогалину, формулюючи принципи, які дозволять екологічному нормуванню стати активним, превентивним компонентом національної безпеки.

Постановка завдання. Мета статті полягає у формулюванні науково-обґрунтованих принципів інтеграції екологічного нормування та стандартів безпеки життєдіяльності, що можуть бути використані як методологічна основа для розробки національної стратегії постконфліктного відновлення України.

Для досягнення цієї мети поставлено такі *завдання*:

1. Визначити теоретичні та методологічні засади концепції соціоекосистеми та її стійкості в умовах комбінованих загроз.
2. Обґрунтувати роль екологічного нормування як активного інструменту управління еколого-техногенними ризиками в умовах війни.
3. Проаналізувати критичні виклики для нормування, спричинені синергією воєнних та техногенних впливів (проблеми тимчасового нормування та мультимедійного ефекту).
4. Сформулювати ключові принципи інтеграції екологічного нормування та ЦЗ, орієнтовані на стратегію «зеленої» рекультивациі [14, 15].
5. Розробити практичні рекомендації та проєктні рішення, включно з використанням технологій Штучного Інтелекту (ШІ), для реалізації цих принципів на рівні територіальних громад [3, 16].

Теоретичні та методологічні засади. Концепція соціоекосистеми в контексті стійкості. Об'єктом екологічного нормування в умовах відновлення є не просто довкілля, а *соціоекосистема* – складна, взаємозалежна система, що включає природні (екосистема) та соціально-економічні (суспільство, інфраструктура) компоненти [6]. Стійкість соціоекосистеми визначається її здатністю повертатися до функціонального стану після зовнішнього збурюючого впливу, мінімізуючи втрати.

В умовах воєнної агресії соціоекосистеми зазнають таких видів впливу. Руйнування житла, заводів, мостів, що змінює ландшафт і гідрологію. Вивільнення небезпечних речовин (хлор, аміак, нафтопродукти) внаслідок руйнування промислових об'єктів. Накопичення величезних обсягів будівельного сміття, що містить азбест, важкі метали та інші небезпечні компоненти.

Стійкість такої системи після катастрофи залежить від її *екологічного резерву* – здатності природних компонентів (грунт, вода, повітря) до самоочищення та асиміляції забруднень. *Мета* нормування у стратегії відновлення полягає у тому, щоб не просто відновити, а й *збільшити* цей резерв, застосовуючи принцип «Build Back Better» (Відбудувати краще, ніж було) [13].

Роль екологічного нормування ГДК, ГДВ у запобіганні катастрофам.

Екологічне нормування – це встановлення комплексу гранично допустимих показників впливу антропогенної діяльності на навколишнє середовище, що гарантують екологічну безпеку та охорону здоров'я населення [1, 17]. Ключовими інструментами є: ГДК, які встановлюють безпечний рівень вмісту забруднюючих речовин у компонентах довкілля (вода, повітря, грунт) [17]; ГДК/ГДС, які регулюють обсяг і склад забруднень, що надходять від стаціонарних джерел [1].

У мирний час нормування використовується переважно для *дозволу та контролю* господарської діяльності. У стратегії постконфліктного відновлення його роль має бути кардинально змінена на *превентивну та планувальну* [9]. Нормативи мають слугувати не лише межею, за якою накладається штраф, а *критерієм для прийняття рішень* щодо: вибору екологічно безпечних ділянок для відновлення житла та соціальної інфраструктури; кількісної оцінки екологічної шкоди згідно з українськими [18] та міжнародними методиками [7]; встановлення проміжних та кінцевих цільових нормативів чистоти ґрунтів та вод.

Таким чином, нормування стає активним інструментом управління ризиками та планування інвестицій у «зелене» відновлення [14].

Сутність та функціонал ЦЗ в умовах війни.

Цивільний захист – це система заходів, спрямованих на запобігання надзвичайним ситуаціям, ліквідацію їх наслідків, а також захист населення і територій [10]. В умовах воєнного конфлікту функціонал ЦЗ розширюється, охоплюючи не лише короткострокове реагування, а саме евакуація, надання притулку, але й *довготривалі завдання екологічної безпеки*.

Ключові завдання ЦЗ, що перетинаються з нормуванням є оперативна оцінка масштабів катастрофи та встановлення зон обмеженого доступу [11], знешкодження або локалізація джерел забруднення [19–21], забезпечення екологічної безпеки територій, які повертаються до господарського використання.

На етапі відновлення ЦЗ має інтегрувати екологічні нормативи у свою роботу, приймаючи рішення щодо вимоги до якості повітря та ґрунту на відновлюваних територіях, визначення нормативів для сортування, переробки та безпечного захоронення будівельного сміття [14].

Без цієї інтеграції ЦЗ ризикує відновити інфраструктуру на територіях із неприпустимо високим рівнем екологічного ризику, що створює *відкладену небезпеку* для здоров'я населення наприклад через забруднення ґрунту важкими металами.

Вклад основного матеріалу

Аналіз викликів та принципи інтеграції. Військовий конфлікт породжує два критичних виклики для системи екологічного нормування, що вимагають негайного вирішення для забезпечення безпеки життєдіяльності.

Виклик 1. *Проблема тимчасового (аварійного) нормування.*

Традиційні ГДК розраховані на довготривалий, хронічний вплив, але не на короткочасне, масове надходження токсикантів (наприклад, при пожежі на нафтобазі чи вибуху аміаку) [8, 9]. У зоні надзвичайної ситуації фактична концентрація забруднювачів може перевищувати ГДК у сотні й тисячі разів. Це вимагає

розробки та затвердження механізму *тимчасових, аварійних нормативів (ГДК-АВАРІЯ)*, які будуть діяти протягом обмеженого періоду (фази реагування та початкової ліквідації).

Мета ГДК-АВАРІЯ – забезпечити безпеку рятувальників та населення, що перебуває поблизу зони впливу, а також визначити необхідність і терміни евакуації. Ці нормативи мають враховувати підвищену токсичність продуктів горіння та вторинного забруднення, а також бути інтегрованими в системи швидкого прийняття рішень ЦЗ (наприклад, автоматичне визначення радіусу небезпечної зони).

Виклик 2: *Мультимедійний ефект та синергія забруднень* [11].



Синергія воєнно-техногенних загроз призводить до того, що забруднюючі речовини одночасно впливають на різні компоненти довкілля (повітря, вода, ґрунт), створюючи *мультимедійний ефект* [2, 7]. Наприклад, вибух промислового об'єкта:

Наявні нормативи здебільшого розроблені для оцінки впливу одного забруднювача в одному середовищі. Для стратегії відновлення критично необхідна методологія *комплексного нормування*, яка враховує сукупний ефект від кількох речовин (наприклад, важких металів від боеприпасів + нафтопродуктів) у різних середовищах. Без цього неможливо гарантувати безпеку реконструйованих об'єктів.

Ключові принципи інтеграції нормування та ЦЗ у відновлення. Для подолання цих викликів та забезпечення стійкого відновлення соціоекосистем, необхідно сформулювати та запровадити такі інтегровані принципи:

Принцип 1: *Принцип пріоритету екологічної безпеки ЦЗ – Zero Risk, Нульовий Ризик.*

Полягає у визнанні того, що під час відновлення на уражених територіях норми екологічної безпеки (ГДК, ГДВ) мають бути *жорсткішими* або принаймні еквівалентними до найсуворіших міжнародних стандартів (наприклад, ЄС) [15].

Заборона відновлення житлових, освітніх та медичних об'єктів на територіях, де рівень забруднення ґрунту не відповідає критеріям *відновлюваного* (а не просто допустимого) використання [13]. Цей принцип вимагає обов'язкового екологічного аудиту до проєктування.

Принцип 2: *Принцип територіальної диференціації нормативів.*

Визнання необхідності встановлення тимчасових, адаптивних нормативних зон на час постконфліктного періоду:

– *Критичного забруднення*, Зона I. Території, де рівні забруднення вимагають негайної рекультивативної та заборони будь-якого використання (діють *ГДК-АВАРІЯ*).

– *Перехідного забруднення*, Зона II. Території, де застосовуються тимчасові, більш суворі, ніж довоєнні, нормативи, що дозволяють контрольоване відновлення інфраструктури (діють *ГДК-ПЕРЕХІД*).

– *Відновлювальна*, Зона III. Території, де нормативи поступово гармонізуються до цільових європейських стандартів.

Принцип 3: *Принцип інтегрованого моніторингу.*

Вимога до об'єднання інформаційних потоків систем екологічного моніторингу та систем оповіщення ЦЗ [11].

Дані з автоматизованих постів моніторингу повітря, води та ґрунту (щодо ГДК) мають бути в реальному часі інтегровані в єдину операційну платформу ЦЗ. Це дозволяє ЦЗ не лише отримувати інформацію про ракетні удари, а й миттєво прогнозувати та моделювати поширення вторинних хімічних загроз, корегуючи маршрути евакуації та зони обмежень [3, 11, 16].

Принцип 4: *Принцип «Зеленої» рекультивативної та перехідного нормування.*

Визначення екологічного нормування як обов'язкового компонента управління відходами від руйнування (ВВР) [14, 13].

Необхідно розробити нормативи для ВВР, які містять азбест, ртуть та інші небезпечні речовини, а також встановити норми безпечної концентрації цих речовин для *повторного використання* наприклад у дорожньому будівництві. Цей принцип гарантує, що відновлення не призведе до вторинного забруднення.

Впровадження екологічного компонента в Плани ЦЗ. Ефективна інтеграція вимагає перегляду стандартних документів. Екологічний компонент має бути впроваджений як обов'язковий розділ у Планах ЦЗ територіальних громад: 1. Створення інтерактивних карт, що накладають розташування промислових об'єктів підвищеної небезпеки на екологічно чутливі зони (водозабори, рекреаційні зони). 2. Включення алгоритмів *ГДК-АВАРІЯ* для розрахунку зон хімічного забруднення та необхідних заходів (укриття, евакуація)

до стандартних протоколів ЦЗ [10]. 3. Жоден проєкт капітального будівництва чи реставрації в зоні, що постраждала від бойових дій, не має бути затверджений без сертифіката екологічного аудиту, що підтверджує відповідність ґрунту і води новому, посиленому нормативу (Принцип 1).

Застосування технологій Штучного Інтелекту (ШІ) для адаптивного нормування. Для реалізації вищезазначених принципів критично важливим є використання інноваційних технологій, зокрема ШІ та машинного навчання (Machine Learning, ML) [16]. ШІ дозволяє перейти від статичного нормування до *динамічного та адаптивного*.

Функціонал ШІ в інтегрованій системі. Моделі ML можуть аналізувати метеорологічні дані, гідрологічні моделі та склад викидів, прогножуючи, як і куди речовини, випущені в повітря, осядуть у ґрунті чи потраплять у водні об'єкти [16]. Це дозволяє ЦЗ оперативно реагувати на *відкладені* екологічні загрози. На основі поточних даних моніторингу та прогнозів, ШІ здатний вносити корективи у параметри ГДК-ПЕРЕХІД для конкретного району (Принцип 2), оптимізуючи зусилля з рекультивациі. ШІ може обробляти супутникові знімки (виявляючи зміни кольору води, рослинного покриву), дані дронів та сенсорів, створюючи високоточні, динамічні карти зон забруднення, що є основою для застосування Принципу 3 (Інтегрований моніторинг) [16].

Впровадження ШІ перетворює систему екологічного нормування на *самонавчальний механізм управління ризиками*, який діє на випередження, а не постфактум, що є запорукою успіху в стратегії відновлення.

Шляхи реалізації принципів у стратегії відновлення. Реалізація сформульованих принципів вимагає не лише методологічних змін, а й практичних кроків у трьох основних напрямках: законодавство, місцеве самоврядування та міжнародна співпраця.

Рекомендації щодо законодавчого забезпечення.

Для інституціоналізації інтеграції екологічного нормування та ЦЗ необхідно внести зміни до профільних законів та нормативно-правових актів.

1. *Запровадження категорії «Тимчасові аварійні нормативи (ГДК-АВАРІЯ)».* Чітке визначення юридичного статусу, порядку розробки та терміну дії ГДК-АВАРІЯ у Законі України «Про охорону навколишнього природного середовища» [1] та відповідних підзаконних актах. Це дозволить ЦЗ використовувати їх як легітимну основу для прийняття рішень (евакуація, ізоляція) у гострий період катастрофи, реалізуючи Принцип 3 (Інтегрованого моніторингу).

2. *Інтеграція екологічного аудиту в будівельний процес.* Встановлення на законодавчому рівні обов'язкової вимоги щодо проведення спеціалізованого екологічного аудиту ґрунту і води на ділянках, що постраждали від бойових дій, до початку проєктування. Аудит має підтверджувати відповідність ділянки підвищеним нормативам (Принцип 1), а його результати повинні бути інтегровані в єдиний реєстр збитків [18].

3. *Нормування відходів руйнування.* Створення окремого нормативного поля для класифікації та поводження з відходами руйнування (ВВР), що містять підвищені концентрації небезпечних речовин (важкі метали, азбест, ПАВ). Це дозволить реалізувати Принцип 4 («Зеленої» рекультивациі), стимулюючи безпечне сортування та повторне використання інертних матеріалів [14].

Практичні рекомендації для органів місцевого самоврядування (ОМС). На рівні територіальних громад ОМС є ключовими суб'єктами, що впроваджують інтегровані принципи.

1. *Розробка регіональних ГДК-ПЕРЕХІД.* Використовуючи Принцип 2 (Територіальної диференціациі), ОМС мають право ініціювати встановлення місцевих (регіональних) нормативів ГДК-ПЕРЕХІД, які є більш жорсткими, ніж загальнонаціональні, для певних зон (наприклад, для рекреаційних зон чи водозаборів) [17]. Це інструмент гнучкого управління ризиками.

2. *Створення єдиної ГІС-платформи (Геоінформаційна система).* Інтеграція даних моніторингу, кадастру, містобудівної документації та інформації ЦЗ (зони ураження) у єдину ГІС. Ця платформа, підсилена алгоритмами ШІ, дасть змогу ОМС приймати рішення щодо релокації об'єктів та зонування, миттєво оцінюючи екологічний ризик (реалізація Принципу 3: *Інтегрованого моніторингу та ШІ*).

3. *Забезпечення екологічної безпеки забудови.* Запровадження внутрішнього регуляторного механізму, згідно з яким вибір ділянки для будівництва соціального житла чи шкіл здійснюється виключно у Зонах II або III (відповідно до Принципу 2), підтверджених екологічним аудитом. Використання геотермальних та сонячних технологій у відновлюваних проєктах має стати пріоритетом.

Перспективи та виклики міжнародної співпраці. Інтеграція України до європейського простору вимагає гармонізації національної системи нормування.

1. *Гармонізація нормативів (EU Acquis).* Приведення українських ГДК, особливо для ґрунтів та питної води, до вимог європейських Директив (наприклад, Водна Рамкова Директива, Директива про якість атмосферного повітря) [15]. Це забезпечить відповідність Принципу 1 (*Zero Risk*) і відкриє шлях для міжнародного фінансування проєктів відновлення [13].

2. *Транскордонний екологічний моніторинг.* Розширення співпраці з сусідніми країнами та міжнародними організаціями (UNEP, ОБСЄ) для створення єдиної системи транскордонного моніторингу [7]. Це особливо актуально для басейнів річок (Дніпро, Дунай), де мультимедійний ефект (Виклик 2) може мати транскордонні наслідки. Дані з цієї системи також мають бути інтегровані в єдину операційну платформу ЦЗ.

3. *Переймання досвіду «Зеленої» рекультивациі.* Залучення міжнародних експертів для розробки методологій рекультивациі територій, забруднених військовими відходами. Це включає використання біоремедиациі та фіторемедиациі, що є «зеленими» технологіями для повернення земель до сільськогосподарського чи рекреаційного використання відповідно до встановлених нормативів (Принцип 4) [14].

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямі. Проведене дослідження досягло своєї мети, сформулювавши науково-обґрунтовані принципи інтеграції екологічного нормування та стандартів безпеки життєдіяльності як методологічну основу для стратегії постконфліктного відновлення України. Визначено, що традиційна, статична система екологічних нормативів (ГДК, ГДВ), розроблена для мирного часу, є недостатньою для реагування на унікальну синергію воєнних та техногенних загроз.

У процесі дослідження обґрунтовано наступні ключові **висновки:**

1. Доведено необхідність зміни парадигми: екологічне нормування, яка має перейти від інструменту постфактум-контролю до *активного, превентивного інструменту управління еколого-техногенними ризиками* та стратегічного планування відновлення соціоекосистем.

2. Ідентифіковано та проаналізовано два головні виклики: потреба у створенні механізму *Тимчасових аварійних нормативів (ГДК-АВАРІЯ)* для оперативного реагування ЦЗ на масовані, короткочасні викиди; а також необхідність розробки методології комплексного нормування, що враховує *мультимедійний ефект синергії забруднюючих речовин у різних середовищах (повітря, ґрунт, вода).*

3. Сформульовано чотири основоположні принципи, які мають бути інтегровані в національну стратегію відновлення:

– Встановлення жорсткіших, ніж довоєнні, нормативів для територій відновлення;

– Запровадження адаптивних нормативних зон (Зона I – Критичного забруднення, Зона II –Перехідного, Зона III – Відновлювальна);

– Об'єднання інформаційних потоків екологічного моніторингу та систем оповіщення ЦЗ у реальному часі;

– Нормування відходів руйнування (ВВР) для їх безпечної переробки та повторного використання.

4. Запропоновано конкретні шляхи реалізації на різних рівнях:

– Формалізація категорії *ГДК-АВАРІЯ* та обов'язкового екологічного аудиту проектів відновлення;

– Впровадження *ГІС-платформ*, підсилених *технологіями Штучного Інтелекту*, що дозволяє здійснювати динамічне прогнозування мультимедійного ефекту та адаптивне коригування нормативів (*ГДК-ПЕРЕХІД*);

– Приведення національних нормативів до стандартів ЄС (EU Acquis) та розширення транскордонного моніторингу.

Впровадження цих інтегрованих принципів перетворить систему екологічного нормування на запоруку безпеки життєдіяльності, забезпечуючи, що відновлення України відбудеться відповідно до стратегії «Build Back Better», мінімізуючи екологічний борг для майбутніх поколінь.

Список використаних джерел:

1. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». Київ, 1991. URL: https://zakononline.ua/documents/show/155298__599695

2. Хвесик М. Г., Пастушенко П. П. Екологічна безпека в умовах надзвичайних ситуацій та воєнних конфліктів: виклики та механізми забезпечення. *Екологічний вісник*. 2023. № 2(54). С. 15–26. URL: <https://www.google.com/search?q=https://ecology.donnu.edu.ua/article/view/1000>

3. Pogrebnyak V., Kondrat O., Pogrebnyak A., & Perkun I. Transforming Occupational Safety and Civil Defense: Wartime Challenges and Solutions. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*. 2025. No 1, Vol.64, 13–23. <https://doi.org/10.26906/znp.2025.64.4034>

4. Погребняк В. Г., Кондрат О. Р., Перкун І. В., Погребняк А. В. Моделювання професійних і воєнних ризиків в системі безпеки праці та цивільного захисту на об'єктах нафтогазової галузі. *Прикарпатський вісник НТШ*. Число. 2025. № 20, Т. 77, 9 с.

5. Погребняк В. Г., Перкун І. В., Погребняк А. В. Від охорони праці до комплексної безпеки: стратегії інтеграції цивільного захисту в корпоративні системи управління. *Системи та технології*. 2025. No. 2, Vol. 69, 13 с.

6. Погребняк В. Г. Людина і біосфера. Інтеграція знань – стратегія виживання. *VIRTUS: Scientific Journal*. 2021. No. 57, October. 25–30. URL: <http://conference-ukraine.com.ua/ua/virtus>

7. Assessment of Environmental Damage in Conflict Zones: Methodological Guidelines. Geneva : United Nations Environment Programme (UNEP) Publications, 2023. URL: <https://www.google.com/search?q=https://www.unep.org/resources/methodological-guidelines-environmental-damage-conflict-zones>

8. Шевчук В. Я., Саталкіна О. В. Екологічне нормування та управління ризиками. Київ : Наукова думка, 2021. 384 с. URL: https://www.google.com/search?q=https://pidruchniki.com/13931120/ekologiya/ekologichne_normuvannya_upravlinnya_rizikami_shevchuk_v_ya

-
9. Боголюбов В. М. Еколого-техногенні ризики та безпека життєдіяльності: інтегрований підхід. Київ: Кондор, 2022. 512 с. URL: <https://www.google.com/search?q=https://kondor-izdat.com.ua/bogolubov-ekologo-tehnogeni-riziki>
10. Закон України «Про Цивільний захист». Київ, 2013. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>
11. Скрипчук П. П. Інтеграція Цивільного захисту та екологічного моніторингу в Україні: проблеми та шляхи вирішення. Київ: НІСД, 2022. 180 с. URL: <https://www.google.com/search?q=https://nisd.gov.ua/assets/files/docs/monitor/integracia-civilnogo-zahistu-ta-ekologichnogo-monitoringu.pdf>
12. Environmental Protection in Military Activities and Operations. NATO Standardization Office, 2021. URL: https://www.google.com/search?q=https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2021/4/pdf/environmental-protection-in-military-activities-and-operations.pdf
13. Guidelines for Post-Conflict Reconstruction: Integrating Environmental Sustainability (Build Back Better). Washington, D.C. : World Bank Group Publications, 2020. URL: <https://www.google.com/search?q=https://documents1.worldbank.org/curated/en/969061603700057404/pdf/Integrating-Environmental-Sustainability-Build-Back-Better.pdf>
14. Bilgen S., Büyükyıldız M. Post-Conflict Environmental Assessment and Reconstruction Policies: Lessons for the Green Recovery. *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 320. 116035. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116035>
15. The European Green Deal. Brussels : European Commission, COM/2019/640 final, 2019. URL: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2019-640-final>
16. Lui J., Zhang Y. AI-Driven Geospatial Modeling for Adaptive Environmental Regulation and Disaster Response. *Environmental Science & Technology*. 2024. Vol. 58, No. 10. P. 4200–4210. URL: <https://www.google.com/search?q=https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.4c01234>
17. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів (ДСП 173-96). Київ, 1996. URL: <https://www.google.com/search?q=https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0412-96>
18. Про затвердження Порядку визначення шкоди та збитків, завданих Україні внаслідок збройної агресії Російської Федерації: Постанова Кабінету Міністрів України від 17 березня 2023 р. № 255. URL: <https://www.google.com/search?q=https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-poriadku-vyznachennia-shkody-ta-zbitkiv-zavdanykh-ukraini-vnaslidok-zbroinoi-ahresii-rosiiskoi-federatsii-a255>
19. Pogrebnyak V. G., Voloshyn V. S. *Ecological technology of creating water-protective screens*. Donetsk : KNOWLEDGE, 2010. 482 p.
20. Pogrebnyak V. G. Polymer Macromolecules as a Tool for Studying Wall-Adjacent Turbulence Flow. Proceedings of the 2nd International Symposium on Seawater Drag Reduction. Korea. Busan : ASERC. 2005. P. 79–90.
21. Pogrebnyak A. V., Perkun I. V., Pogrebnyak V. G., Shymanskyi V. Ya. Improvement of labour safety and safety of life activities by increasing the efficiency of water fire extinguishing systems. Системи та технології. 2025. No.1, Vol. 69, 187–193. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.22>

References:

1. Verkhovna Rada of Ukraine. (1991). Pro okhoronu navkolysnogo pryrodnoho seredovyscha [On environmental protection] (Law of Ukraine No. 1264-XII). Retrieved from: https://zakononline.ua/documents/show/155298_599695
2. Khvesyk, M. H., & Pastushenko, P. P. (2023). Ekolohichna bezpeka v umovakh nadzvychnykh sytuatsii ta voiennykh konfliktiv: vyklyky ta mekhanizmy zabezpechennia [Environmental safety in conditions of emergencies and military conflicts: challenges and mechanisms of provision]. *Ekolohichniy visnyk*, (2/54), 15–26. Retrieved from: <https://ecology.donnu.edu.ua/article/view/1000>
3. Pogrebnyak, V., Kondrat, O., Pogrebnyak, A., & Perkun, I. (2025). Transforming Occupational Safety and Civil Defense: Wartime Challenges and Solutions. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 1(64), 13–23. <https://doi.org/10.26906/znp.2025.64.4034>
4. Pogrebnyak, V. G., Kondrat, O. R., Perkun, I. V., & Pogrebnyak, A. V. (2025). Modeliuvannia profesiinykh i voiennykh ryzykiv v systemi bezpeky pratsi ta tsyvilnogo zakhystu na ob'ektakh naftohazovoi haluzi [Modeling of occupational and military risks in the system of occupational safety and civil protection at oil and gas industry facilities]. *Prykarpatskyi visnyk NTSH*, 77(20), 9.
5. Pogrebnyak, V. G., Perkun, I. V., & Pogrebnyak, A. V. (2025). Vid okhorony pratsi do kompleksnoi bezpeky: stratehii intehtratsii tsyvilnogo zakhystu v korporatyvni systemy upravlinnia [From occupational safety to comprehensive security: strategies for integrating civil protection into corporate management systems]. *Systemy ta tekhnolohii*, 69(2), 13.
6. Pogrebnyak, V. G. (2021). Liudyna i biosfera. Intehtratsiia znan – stratehiia vyzyhvanntia [Man and the biosphere. Integration of knowledge – survival strategy]. *VIRTUS: Scientific Journal*, (57), 25–30. Retrieved from: <http://conference-ukraine.com.ua/ua/virtus>

-
7. United Nations Environment Programme. (2023). Assessment of environmental damage in conflict zones: Methodological guidelines. Retrieved from: <https://www.unep.org/resources/methodological-guidelines-environmental-damage-conflict-zones>
 8. Shevchuk, V. Ya., & Satalkina, O. V. (2021). Ekolohichne normuvannya ta upravlinnia ryzykamy [Environmental regulation and risk management]. *Naukova dumka*. Retrieved from: https://pidruchniki.com/13931120/ekologiya/ekologichne_normuvannya_upravlinnya_rizykami_shevchuk_v_ya
 9. Boholiubov, V. M. (2022). Ekoloho-tekhnohenni ryzyky ta bezpeka zhyttiediialnosti: intehrovanyi pidkhid [Ecological and man-made risks and life safety: an integrated approach]. Kondor. Retrieved from: <https://kondor-izdat.com.ua/bogolubov-ekologo-tehnogeni-riziki>
 10. Verkhovna Rada of Ukraine. (2013). Kodeks tsyvilnoho zakhystu Ukrainy [Code of Civil Protection of Ukraine] (Law of Ukraine No. 5403-VI). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>
 11. Skrypchuk, P. P. (2022). Intehratsiia Tsyvilnoho zakhystu ta ekolohichnoho monitorynhu v Ukraini: problemy ta shliakhy vyrishennia [Integration of Civil Protection and environmental monitoring in Ukraine: problems and solutions]. National Institute for Strategic Studies. Retrieved from: <https://nisd.gov.ua/assets/files/docs/monitor/integracia-civilnogo-zahistu-ta-ekologichnogo-monitoringu.pdf>
 12. NATO Standardization Office. (2021). Environmental protection in military activities and operations. Retrieved from: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2021/4/pdf/environmental-protection-in-military-activities-and-operations.pdf
 13. World Bank Group. (2020). Guidelines for post-conflict reconstruction: Integrating environmental sustainability (Build Back Better). Retrieved from: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/969061603700057404/pdf/Integrating-Environmental-Sustainability-Build-Back-Better.pdf>
 14. Bilgen, S., & Büyükyıldız, M. (2022). Post-conflict environmental assessment and reconstruction policies: Lessons for the Green Recovery. *Journal of Environmental Management*, 320, 116035. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116035>
 15. European Commission. (2019). The European Green Deal (COM/2019/640 final). Retrieved from: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2019-640-final>
 16. Lui, J., & Zhang, Y. (2024). AI-Driven geospatial modeling for adaptive environmental regulation and disaster response. *Environmental Science & Technology*, 58(10), 4200–4210. Retrieved from: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.4c01234>
 17. Ministry of Health of Ukraine. (1996). Derzhavni sanitarni pravyla planuvannya ta zabudovy naselenykh punktiv [State sanitary rules for planning and development of settlements] (DSP 173-96). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0412-96>
 18. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2023). Pro zatverdzhennia Poriadku vyznachennia shkody ta zbytkiv, zavdanykh Ukraini vnaslidok zbroinoi ahresii Rosiiskoi Federatsii [On approval of the Procedure for determining damage and losses caused to Ukraine as a result of the armed aggression of the Russian Federation] (Resolution No. 255). Retrieved from: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-poriadku-vyznachennia-shkody-ta-zbytkiv-zavdanykh-ukraini-vnaslidok-zbroinoi-ahresii-rosiiskoi-federatsii-a255>
 19. Pogrebnyak, V. G., & Voloshyn, V. S. (2010). Ecological technology of creating water-protective screens. Knowledge.
 20. Pogrebnyak, V. G. (2005). Polymer Macromolecules as a Tool for Studying Wall–Adjacent Turbulence Flow. Proceedings of the 2nd International Symposium on Seawater Drag Reduction (pp. 79–90). ASERC.
 21. Pogrebnyak, A. V., Perkun, I. V., Pogrebnyak, V. G., & Shymanskyi, V. Ya. (2025). Improvement of labour safety and safety of life activities by increasing the efficiency of water fire extinguishing systems. *Systemy ta tekhnolohii*, 69(1), 187–193. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.22>

Дата першого надходження статті до видання: 30.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

Погребняк В. Г., доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технології захисту навколишнього середовища
та безпеки праці Івано-Франківського національного технічного
університету нафти і газу
ORCID: 0000-0002-7735-3408

Гапоненко С. О., кандидат економічних наук,
доцент кафедри міжнародного туризму та готельно-ресторанного
бізнесу Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-6647-3335

Рудянова Т. М., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного
забезпечення Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-2750-6031

Погребняк А. В., доктор технічних наук, професор,
професор кафедри міжнародного туризму та готельно-
ресторанного бізнесу Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0003-3214-6410

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ В СИСТЕМІ БЕЗПЕКИ НА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Ключовою тезою роботи є необхідність фундаментальної зміни парадигми – переходу до проактивної, ризик-орієнтованої моделі управління, що фокусується на прогнозуванні та нейтралізації загроз до їх реалізації. Теоретичною основою цього підходу виступає, зокрема, модель «швейцарського сиру» Джеймса Різона, яка демонструє, що аварія є наслідком збігу прихованих недоліків на кількох рівнях захисту, а саме технологічному, організаційному, компетентнісному та наглядовому. Метою проактивної системи є постійне виявлення та усунення цих «дірок» для унеможливлення катастрофічного збігу.

Технологічним фундаментом для реалізації проактивного підходу визначено цифрову трансформацію на засадах індустрії 4.0. Запропоновано створення єдиної інтелектуальної екосистеми, де: Інтернет речей IoT виступає системою збору даних у реальному часі через датчики вібрації, корозії на обладнанні, газоаналізатори в робочих зонах та носимі «розумні» каски і біометричні трекери для персоналу; штучний інтелект AI обробляє ці дані для прогнозування відмов обладнання та інтелектуальної відеоаналітики; імерсивні технології VR/AR та цифрові двійники забезпечують відпрацювання навичок в екстремальних ситуаціях без ризику для життя та дозволяють безпечно моделювати найскладніші аварійні сценарії.

Для об'єктивізації управлінських рішень пропонується перехід від якісних оцінок до кількісного аналізу ризиків QRA. Цей підхід базується на формулі Ризик = Імовірність × Наслідки та використовує математичні інструменти, такі як дедуктивний аналіз «дерева відмов» FTA та індуктивний аналіз «дерева подій» ETA для розрахунку ймовірностей складних аварій. Такий аналіз дозволяє проводити економічно обґрунтовану оцінку «витрати-вигоди» для інвестицій у системи безпеки.

Ключовим висновком роботи є те, що в сучасних умовах межа між охороною праці, техногенною безпекою та цивільним захистом повністю стирається. Запропоновано концептуальну модель єдиної, інтегрованої системи управління безпекою, що об'єднує ці три компоненти. Практична реалізація моделі передбачає облаштування укриттів, створення дублюючих систем оповіщення та зв'язку, а також проведення комплексних тренінгів, що поєднують навички надання першої допомоги з елементами тактичної медицини. Створення такої адаптивної системи є безальтернативним шляхом для забезпечення захисту персоналу та стійкості функціонування стратегічних підприємств України.

Ключові слова: охорона праці, техногенна безпека, цивільний захист, нафтогазова галузь, управління ризиками, цифровізація, проактивна безпека.



Pogrebnyak V. G., Haponenko S. O., Rudianova T. M., Pogrebnyak A. V. Modern approaches to risk management in the safety system at industrial enterprises

The article provides an in-depth analysis of the safety management system at Ukrainian oil and gas industry enterprises, which operates under conditions of an unprecedented convergence of risks, making outdated, reactive approaches to labor protection not only ineffective but also unacceptable. It is substantiated that in addition to the traditional production hazards inherent in all stages of the cycle—from geological exploration to hydrocarbon processing—three key aggravating factors of modernity have been added. Firstly, a high degree of physical and moral deterioration of infrastructure, which significantly increases the likelihood of accidents due to equipment failure. Secondly, the intensification of production at depleted fields, which generates new, insufficiently studied professional risks. Thirdly, direct military threats that have turned the industry's facilities into strategic targets for missile strikes and UAV attacks. Under such conditions, safety management is transformed from a narrowly focused function into a fundamental element of national resilience.

The key thesis of the work is the need for a fundamental paradigm shift—a transition to a proactive, risk-oriented management model that focuses on predicting and neutralizing threats before they are realized. The theoretical basis for this approach is, in particular, James Reason's "Swiss cheese model", which demonstrates that an accident is the result of a confluence of hidden deficiencies at several levels of defense, namely technological, organizational, competence, and supervisory. The goal of a proactive system is the constant identification and elimination of these "holes" to prevent a catastrophic coincidence.

The technological foundation for implementing a proactive approach is identified as digital transformation based on Industry 4.0 principles. The creation of a unified intellectual ecosystem is proposed, where: the Internet of Things IoT acts as a real-time data collection system through vibration and corrosion sensors on equipment, gas analyzers in work areas, and wearable "smart" helmets and biometric trackers for personnel; artificial intelligence AI processes this data for predictive equipment failure and intelligent video analytics; immersive VR/AR technologies and digital twins provide skills training in extreme situations without risk to life and allow for the safe modeling of the most complex emergency scenarios.

To objectify management decisions, a transition from qualitative assessments to quantitative risk analysis QRA is proposed. This approach is based on the formula $Risk = Probability \times Consequences$ and uses mathematical tools such as deductive "fault tree analysis" FTA and inductive "event tree analysis" ETA to calculate the probabilities of complex accidents. Such analysis allows for an economically justified "cost-benefit" assessment for investments in safety systems.

The key conclusion of the work is that in modern conditions, the line between labor protection, technological safety, and civil defense is completely blurred. A conceptual model of a unified, integrated safety management system that combines these three components is proposed. The practical implementation of the model involves the arrangement of shelters, the creation of duplicate notification and communication systems, and the conduct of comprehensive training that combines first aid skills with elements of tactical medicine. The creation of such an adaptive system is the only way to ensure the protection of personnel and the resilience of the functioning of strategic enterprises in Ukraine.

Key words: occupational safety, oil and gas industry, risk management, life safety, professional risks, digitalization, Internet of Things, proactive safety.

Постановка проблеми. Нафтогазова галузь традиційно є одним зі стовпів національної економіки та ключовим елементом енергетичної безпеки України, забезпечуючи державу власними енергоресурсами та знижуючи залежність від зовнішніх постачальників. Її стабільне функціонування є запорукою життєдіяльності інших стратегічних секторів, від промисловості до аграрного комплексу, та має прямий вплив на добробут громадян [1–3]. Водночас підприємства цієї галузі за своєю сутністю належать до об'єктів підвищеної небезпеки. Виробничі процеси, що охоплюють розвідку, буріння, видобуток, транспортування та переробку вуглеводнів, нерозривно пов'язані з надзвичайно високою концентрацією ризиків для життя і здоров'я персоналу, а також створюють значні загрози для навколишнього природного середовища [4–6].

Специфіка галузі обумовлена складністю технологічних циклів, де застосовується потужне та великогабаритне обладнання, а робота ведеться з речовинами, що мають високий ступінь небезпеки. До постійно діючих факторів ризику належать робота з обладнанням під екстремально високим тиском, наявність у пластових флюїдах та технологічних процесах токсичних речовин, зокрема сірководню, а також постійна присутність легкозаймистих і вибухонебезпечних рідин та газів. Ці умови висувають безпрецедентно високі вимоги до надійності систем безпеки праці (ОП) та безпеки життєдіяльності (БЖД), де будь-яке відхилення від норм чи людська помилка можуть призвести до катастрофічних наслідків.

Постановка завдання. Актуальність дослідження та необхідність перегляду існуючих підходів до управління безпекою посилюється дією трьох ключових обтяжуючих факторів сучасності. По-перше, значна частина інфраструктури галузі, включаючи трубопроводи, компресорні станції та переробні установки, характеризується високим ступенем фізичного та морального зносу. Тривала експлуатація без належної модернізації суттєво підвищує ймовірність виникнення аварій через відмову обладнання, розгерметизацію систем та корозійні процеси. По-друге, виснаження старих родовищ змушує видобувні компанії переходити до інтенсифікації видобутку, що вимагає застосування технологічно складніших і потенційно більш ризикованих методів. Це, у свою чергу, генерує нові, ще недостатньо вивчені професійні ризики для персоналу [7]. По-третє, і це є визначальним викликом сьогодення, повномасштабна війна перетворила підприємства нафтогазової галузі на стратегічні цілі для ворожих атак. До традиційних виробничих ризиків додалися прямі воєнні загрози, такі як ракетні удари та атаки безпілотних літальних апаратів, що можуть спричинити

руйнування критичної інфраструктури. Це створює небезпеку не лише для працівників, а й для населення прилеглих територій, та може призвести до масштабних екологічних катастроф [8]. В таких умовах питання управління безпекою виходить за межі охорони праці і перетворюється на фундаментальний елемент національної стійкості та обороноздатності держави. Комплексна дія цих факторів вимагає негайного переходу до нової філософії безпеки – проактивної, інтегрованої та адаптованої до реалій воєнного часу [9, 10].

Виходячи з вищеведеного **метою статті** є систематизація професійних ризиків у нафтогазовій галузі та розробка концептуальних засад для побудови сучасної, проактивної системи управління безпекою.

Виклад основного матеріалу. Класифікація та аналіз ризиків у нафтогазовій галузі. Ефективне управління безпекою на підприємствах нафтогазового комплексу неможливе без глибокої та всебічної ідентифікації потенційних небезпек. Ризики в цій галузі є багатогранними, взаємопов'язаними і виникають на кожному етапі виробничого ланцюга – від пошуку родовищ до переробки сировини. Простого переліку загроз недостатньо для розробки адекватних заходів контролю; потрібна їх системна класифікація. Найбільш обґрунтованим є підхід, що аналізує ризики за етапами виробничого циклу, доповнюючи його аналізом специфічних загроз, пов'язаних із зовнішніми факторами, такими як воєнний стан, та наскрізними ризиками, зокрема людським фактором [9, 10].

Початковий етап виробничого циклу характеризується високою мобільністю, роботою у віддалених і часто кліматично складних районах, а також інтенсивним використанням важкого механічного обладнання. Безпека на цьому етапі значною мірою залежить від суворого дотримання процедур, справності техніки та фізичної витривалості персоналу. Небезпеки тут мають переважно фізичний, хімічний та психофізіологічний характер [11–17].

Таким чином, на етапі розвідки та буріння домінують ризики, що несуть пряму загрозу життю та здоров'ю персоналу через безпосередній контакт з небезпечним середовищем та обладнанням. Управління безпекою тут має фокусуватися на механічній надійності обладнання, забезпеченні якісними засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) та жорсткому контролю за дотриманням правил виконання робіт (див. Таблицю 1).

Таблиця 1

Аналіз ризиків на етапі геологорозвідки та буріння

Категорія ризику	Специфічні ризики	Можливі наслідки
Фізичні	Високий рівень шуму та вібрації від роботи дизельних генераторів, бурових насосів. Ризик падіння з висоти під час роботи на буровій вежі. Ураження рухомими та обертовими частинами механізмів. Вплив екстремальних погодних умов під час польових робіт. Ризик ураження електричним струмом від силового обладнання	Професійні захворювання: втрата слуху, вібраційна хвороба. Важкі травми, інвалідність, летальні випадки. Травми кінцівок, затягування одягу в механізми. Обмороження, теплові удари, загальне погіршення здоров'я. Електротравми та опіки
Хімічні	Контакт шкіри та дихальних шляхів з токсичними компонентами бурових розчинів. Ризик раптових газо-нафтоводопроводжень (ГНВП) з викидами сірководню (H ₂ S) та інших шкідливих газів	Хімічні опіки, дерматити, алергічні реакції, хронічні отруєння. Гостре отруєння, втрата свідомості, асфіксія, летальні випадки. Займання та вибух
Психофізіологічні	Висока фізична напруга. Вахтовий метод роботи, що веде до порушення біоритмів, накопичення втоми та зниження концентрації уваги. Монотонність праці та психологічний стрес через відрив від сім'ї та роботу в замкнутому колективі	Захворювання опорно-рухового апарату. Зростання ймовірності людської помилки, що може призвести до аварії. Професійне вигорання, зниження працездатності

Після введення свердловини в експлуатацію ризики зміщуються від безпосередніх загроз для бурової бригади до загроз, пов'язаних з процесами, що протікають всередині герметичного обладнання. Основне завдання на цьому етапі – забезпечити цілісність системи «свердловина-трубопровід-сховище» та контролювати параметри флюїду під високим тиском. Ризики тут набувають техногенного, аварійного та екологічного характеру (див. Таблицю 2).

На цих етапах ключовим завданням стає управління цілісністю активів Asset Integrity Management. Пріоритетом є технічна діагностика, антикорозійний захист, моніторинг тиску та впровадження систем раннього виявлення витоків. Наслідки аварій тут мають значно більший масштаб, виходячи за межі виробничого майданчика [18–20].

Нафто- та газопереробні заводи є об'єктами з максимальною концентрацією небезпеки, де в безпосередній близькості відбуваються складні фізико-хімічні процеси. Це створює умови для «ефекту доміно», коли одна аварія може ініціювати ланцюг руйнувань. Ситуація кардинально ускладнюється новими загрозами, що виникли внаслідок воєнних дій, які перетворюють промислові об'єкти на військові цілі [9, 10] (див. Таблицю 3).

Аналіз ризиків на етапах видобутку, підготовки та транспортування

Категорія ризику	Специфічні ризики	Можливі наслідки
Техногенні та аварійні	Робота з обладнанням під високим тиском, що створює ризик розгерметизації. Порушення герметичності магістральних трубопроводів та резервуарів через корозію, механічні пошкодження або диверсії. Критична зношеність значної частини інфраструктури, що підвищує ймовірність відмови обладнання	Потужні вибухи та пожежі, руйнування обладнання та споруд. Масштабні розливи нафти та витoki газу, що призводять до екологічних катастроф. Зростання частоти аварійних ситуацій, непланові зупинки виробництва
Пожежо- та вибухонебезпечність	Постійна наявність легкозаймистих рідин та горючих газів у виробничому циклі. Можливість утворення вибухонебезпечних газоповітряних сумішей на компресорних станціях та в резервуарних парках. Наявність джерел запалювання іскри, статична електрика, гарячі поверхні	Пожежі, що важко піддаються гасінню. Об'ємні вибухи з великим радіусом ураження. Загибель та травмування персоналу, значні матеріальні збитки
Екологічні	Забруднення ґрунту, поверхневих і підземних вод під час аварійних розливів. Труднощі з локалізацією та ліквідацією наслідків аварій у важкодоступній місцевості. Хронічний вплив на екосистеми через невеликі, але постійні витoki	Деградація екосистем, загибель флори та фауни. Забруднення джерел питної води. Довгострокові фінансові витрати на рекультивацію земель
Організаційні	Неналежне інформування персоналу про наявні ризики. Недостатній контроль за дотриманням вимог безпеки з боку підрядних організацій	Зростання рівня травматизму через неправильні дії. Аварії, спричинені некомпетентними діями сторонніх працівників

Таблиця 3

Аналіз комплексних ризиків на етапі переробки та під час воєнного стану

Категорія ризику	Специфічні ризики	Можливі наслідки
Комплексні техногенні переробки	Поєднання в одному процесі високих температур, тиску, агресивних хімічних речовин та каталізаторів. Велика кількість взаємопов'язаних технологічних установок. Планові та аварійні викиди шкідливих речовин в атмосферу	Найвищий рівень ризику виникнення великих промислових аварій з каскадним ефектом. Повне руйнування заводу. Хронічні професійні захворювання персоналу, погіршення екологічної ситуації в регіоні
Воєнні загрози	Пряме ураження критичної інфраструктури ракетними ударами чи дронами. Перебої з енергопостачанням, зв'язком та логістикою, що паралізують роботу систем безпеки. Небезпека для життя та здоров'я персоналу під час виконання робіт в зоні бойових дій або під час повітряних тривог	Масштабні пожежі та вибухи, неконтрольовані викиди небезпечних речовин. Втрата контролю над технологічними процесами, неможливість аварійної зупинки виробництва. Загибель та поранення працівників
Кібервразливість	Цілеспрямовані кібератаки на автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП). Зовнішній вплив на системи контролю безпеки через інформаційні атаки з метою приховати реальні дані або ініціювати аварію	Порушення роботи обладнання, створення аварійної ситуації. Втрата управління над об'єктом, неможливість адекватного реагування персоналу через отримання хибних даних

Ця подвійна природа загроз вимагає інтегрованого підходу, де традиційна промислова безпека має бути нерозривно пов'язана із заходами цивільного захисту, фізичної безпеки та кібербезпеки. Управління ризиками в таких умовах – це, по суті, управління стійкістю всього підприємства [10].

Перехід до проактивної моделі управління безпекою. Традиційна або реактивна модель управління охороною праці, яка десятиліттями панувала на пострадянському просторі, здебільшого орієнтована на реагування на інциденти, що вже сталися [11–17]. Її основні інструменти – це розслідування нещасних випадків, покарання винних та виконання мінімально необхідних нормативних приписів. Такий підхід є вкрай неефективним у складних системах, оскільки він завжди «наздоганяє» трагедію, а не запобігає їй. В умовах нафтогазової галузі, де ціна помилки може вимірюватися десятками життів та мільярдними збитками, очікування аварії для вжиття заходів є неприпустимим.

Сьогодення вимагає фундаментальної зміни парадигми – переходу до проактивної, ризик-орієнтованої моделі [9, 10]. Її суть полягає не в розслідуванні минулих подій, а в прогнозуванні та нейтралізації майбутніх загроз ще до того, як вони зможуть завдати шкоди.

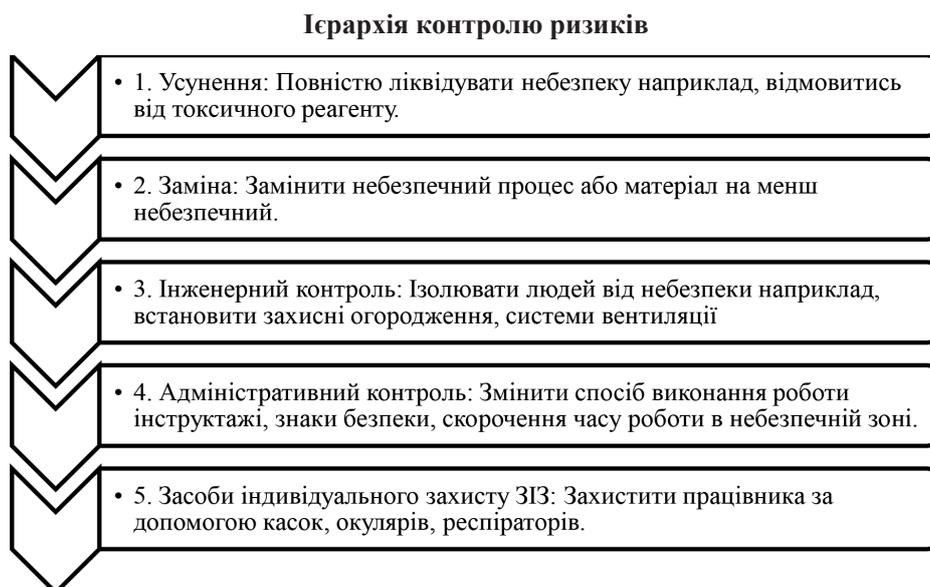
Ключові елементи проактивного підходу. Проактивна система – це безперервний цикл, що складається з чотирьох основних етапів:

Ідентифікація небезпек: Постійний процес виявлення потенційних джерел шкоди на всіх робочих місцях. Це включає регулярні аудити безпеки, аналіз робочих процедур та, що найважливіше, активне залучення працівників, які найкраще знають небезпеки своєї ділянки.

Оцінка ризиків: Визначення ймовірності виникнення небезпечної події та тяжкості її потенційних наслідків. Це дозволяє пріоритезувати загрози та концентрувати ресурси на найкритичніших напрямках.

Розробка заходів управління: Впровадження захисних бар'єрів для мінімізації ризиків до прийняттого рівня. Найбільш ефективним інструментом тут є ієрархія контролю, яка пріоритезує заходи від найбільш до найменш надійних (див. Схему 1).

Схема 1



3. Інженерний контроль: Ізолювати людей від небезпеки наприклад, встановити захисні огороження, системи вентиляції

Моніторинг та перегляд: Постійний контроль за ефективністю впроваджених заходів та їх регулярне коригування відповідно до змін у технологіях, процедурах чи зовнішніх умовах.

Культура безпеки як основа системи. Навіть найдосконаліші технічні системи та процедури не працюватимуть без головного елемента – **культури безпеки**. Це система спільних цінностей та переконань, де кожен працівник, від керівника до робітника, усвідомлює свою відповідальність за безпеку та активно бере участь у запобіганні інцидентам.

Відомий дослідник Джеймс Різон у своїй праці «Managing the Risks of Organizational Accidents» [21] запропонував так звану «модель швейцарського сиру» для пояснення причин виникнення аварій. Вона наочно демонструє важливість культури безпеки (див. Таблицю 4).

Висновок моделі: аварія є не результатом однієї помилки, а наслідком збігу прихованих недоліків на кількох рівнях захисту одночасно. Коли «дірки» в усіх шарах на мить збігаються, вони створюють пряму траєкторію для реалізації загрози.

Кожен «шар сиру» це захисний бар'єр: технологія, процедура, навчання. «Дірки» це приховані недоліки або помилки. Аварія стається лише тоді, коли дірки в усіх шарах збігаються, відкриваючи прямий шлях для загрози. Висока культура безпеки спрямована на те, щоб постійно виявляти та «латати» ці дірки на кожному рівні, роблячи такий збіг практично неможливим.

Цифрові технології для підвищення рівня безпеки. Перехід до проактивної, ризик-орієнтованої парадигми управління безпекою нерозривно пов'язаний з концепцією Індустрії 4.0 [22, 23], що передбачає створення інтегрованих кіберфізичних систем на виробництві. Саме цифровізація виступає технологічним фундаментом, що дозволяє змістити фокус з аналізу ретроспективних показників кількість інцидентів на моніторинг та прогнозування на основі проспективних даних у реальному часі.

Рівень збору даних: Інтернет речей IoT. Основою цифрової системи безпеки є рівень збору даних, де технології IoT оцифровують фізичне середовище, перетворюючи стан обладнання, робочої зони та персоналу на безперервний потік об'єктивної інформації [24, 25] (див. Таблицю 5).

Таблиця 4

Модель «швейцарського сиру» для аналізу причин аварій

Захисний бар'єр «Шар сиру»	Призначення бар'єра	Приклад недоліку «Дірка в сиру»	Як недолік сприяє аварії
Технологічний бар'єр	Автоматично запобігати небезпечним відхиленням або сповіщати про них	Несправність датчика, збій у програмному забезпеченні, прихований дефект обладнання	Система не спрацювала, і початкова проблема залишилася непоміченою персоналом
Організаційний бар'єр: процедури та інструкції	Регламентувати правильні та безпечні дії персоналу в стандартних та аварійних ситуаціях	Нечітко прописана інструкція, застарілий регламент, свідоме порушення правил заради економії часу	Працівник діяв неправильно, оскільки інструкція була незрозумілою або він вирішив її проігнорувати
Бар'єр компетентності: навчання та тренування	Забезпечити, щоб персонал знав правила та вмів діяти правильно, особливо в умовах стресу	Формальне проведення навчання, недостатня кількість практичних тренувань наприклад, на VR-тренажерах, відсутність перевірки знань	У критичний момент працівник розгубився або прийняв хибне рішення, бо не мав відпрацьованих навичок
Бар'єр нагляду: контроль та аудит	Перевіряти, чи дотримуються процедури, чи справне обладнання, та чи ефективне навчання	Недостатній контроль з боку керівництва, ігнорування «дрібних» порушень, формальні аудити «для галочки»	Систематичні порушення та недоліки стали нормою, і ніхто не звернув на них увагу до того, як сталася аварія

Таблиця 5

Застосування IoT для моніторингу безпеки

Компонент системи	Технологія	Функція у системі безпеки
Стационарне обладнання	Датчики вібрації, температури, тиску, акустичні сенсори, датчики корозії	Безперервний моніторинг «здоров'я» обладнання, раннє виявлення відхилень та передаварійних станів
Робоча зона	Стационарні та портативні газоаналізатори	Миттєве виявлення витоків небезпечних газів метан, H ₂ S, автоматична активація систем тривоги та вентиляції
Персонал	Носимі пристрої: «розумні» каски, біометричні трекери, персональні газоаналізатори	Контроль місцезнаходження, умов у зоні дихання, фізіологічних показників: втома, стрес та фіксація падінь

Таблиця 6

Використання ШІ для прогнозування та контролю ризиків

Напрямок застосування	Опис технології	Вплив на безпеку
Предиктивне обслуговування	Моделі машинного навчання ML аналізують історичні та поточні дані з датчиків для розрахунку прогнозного часу до відмови обладнання	Перехід від реактивних/планових ремонтів до проактивного обслуговування «за станом», що запобігає аварійним зупинкам
Інтелектуальна відеоаналітика	Системи комп'ютерного зору в реальному часі аналізують відеопотоки з камер для ідентифікації небезпечних ситуацій	Автоматичний контроль за використанням ЗІЗ, дотриманням процедур, виявлення перших ознак задимлення або витоків

Таблиця 7

Імерсивні технології та моделювання в управлінні безпекою

Технологія	Сутність застосування	Ключова перевага для безпеки
Віртуальна реальність VR	Створення високореалістичних імерсивних симуляторів для відпрацювання дій в екстремальних ситуаціях	Формування у персоналу стійких практичних навичок м'язової пам'яті для дій в умовах стресу без ризику для життя
Доповнена реальність AR	Накладання цифрової інформації: схеми, інструкції на реальне обладнання через AR-окуляри	Мінімізація когнітивного навантаження та ймовірності помилки під час складних ремонтних робіт; можливість віддаленої допомоги експерта
Цифрові двійники Digital Twins	Створення точної віртуальної копії об'єкта, що синхронізується з ним у реальному часі	Можливість безпечного моделювання сценаріїв «що, якщо?», тестування планів реагування та оптимізація технологічних процесів з точки зору безпеки

Рівень аналізу: Штучний інтелект AI та предиктивна аналітика. Зібрані масиви даних Big Data обробляються на аналітичному рівні за допомогою алгоритмів штучного інтелекту, які виявляють приховані закономірності та будують прогнози [26] (див. Таблицю 6).

Рівень взаємодії та моделювання: VR/AR та цифрові двійники. На цьому рівні відбувається ефективна взаємодія людини з цифровою системою та використовується комплексне моделювання для всебічного аналізу ризиків (див. Таблицю 7).

Синергетичне поєднання цих технологічних рівнів створює єдину інтелектуальну екосистему, яка трансформує управління безпекою з нормативно-реактивної функції в проактивний, предиктивний та невід’ємний компонент забезпечення стійкості та ефективності виробництва.

Кількісний аналіз інтегрованих ризиків. Після ідентифікації небезпек та впровадження цифрових інструментів для збору даних, наступним логічним кроком є перехід до кількісної оцінки ризиків. Якісних категорій «високий», «середній», «низький» недостатньо для прийняття обґрунтованих управлінських рішень, особливо коли мова йде про інвестиції в дорогі системи безпеки. Математичне моделювання дозволяє об’єктивно розрахувати рівні ризику, порівняти ефективність різних захисних заходів та визначити пріоритети для мінімізації загроз.

Імовірнісна оцінка ризиків Probabilistic Risk Assessment, PRA. Основою кількісного аналізу є імовірнісний підхід, який визначає ризик як функцію двох змінних: імовірності виникнення небажаної події та тяжкості її наслідків. Класична формула ризику має вигляд:

$$R = PC,$$

де R – ризик (кількісна міра, наприклад, очікувані фінансові втрати на рік або індивідуальний ризик загибелі); P – імовірність (частота виникнення ініціюючої події та імовірність відмови захисних систем); C – наслідки (кількісна оцінка шкоди: фінансові збитки, площа забруднення, кількість потенційних жертв).

Для розрахунку цих компонентів використовуються спеціалізовані математичні та логічні методи.

Методи аналізу «Дерево відмов» та «Дерево подій». Для розрахунку ймовірності P складних аварій застосовуються два взаємодоповнюючі методи: аналіз дерева відмов Fault Tree Analysis [27], FTA та аналіз дерева подій Event Tree Analysis, ETA [28] (див. Таблицю 8).

Таблиця 8

Порівняльний аналіз методів FTA та ETA

Характеристика	Аналіз дерева відмов FTA	Аналіз дерева подій ETA
Напрямок аналізу	Дедуктивний «зверху-вниз»	Індуктивний «знизу-вгору»
Початкова точка	Головна подія – аварія, наприклад, вибух резервуара	Ініціююча подія – відмова, наприклад, витік газу
Мета аналізу	Знайти всі можливі комбінації відмов обладнання та помилок персоналу, що призводять до аварії	Проаналізувати всі можливі сценарії розвитку аварії залежно від спрацювання чи відмови систем безпеки
Результат	Ймовірність настання головної події	Ймовірності та наслідки кожного з можливих кінцевих сценаріїв

Моделювання фізичних наслідків аварій. Для кількісної оцінки наслідків C використовуються математичні моделі, що описують фізичні процеси під час аварії. Вони дозволяють спрогнозувати зони ураження.

Моделі розсіювання: Для прогнозування поширення хмари токсичного або горючого газу використовуються моделі, від простих гаусових моделей для відкритих просторів до складних CFD-моделей обчислювальна гідродинаміка, які враховують рельєф місцевості та наявність перешкод.

Моделі пожеж та вибухів: Для оцінки наслідків займання розраховуються параметри ураження, як-от теплове випромінювання від пожеж та надлишковий тиск ударної хвилі під час вибуху наприклад, за допомогою моделі TNT-еквіваленту.

Комплексний приклад кількісної оцінки ризику. Розглянемо гіпотетичний приклад для ілюстрації методології.

Сценарій: Розгерметизація магістрального газопроводу високого тиску через корозію з подальшим вибухом парогазової хмари Vapour Cloud Explosion – VCE поблизу компресорної станції.

Крок 1: Розрахунок імовірності P за допомогою дерева подій ETA

Масштабний витік газу. Зі статистичних даних відомо, що частота такої події для даного типу трубопроводу складає $P_{init} = 1 \cdot 10^{-4}$ подій/рік. Чи відбулося негайне займання? Імовірність НЕ займання дорівнює 0.8. Чи спрацювала система виявлення витіку та аварійної зупинки? Імовірність відмови системи дорівнює 0.1. Чи знайшла хмара віддалене джерело запалювання до розсіювання? Імовірність дорівнює 0.2.

Розрахунок імовірності сценарію VCE: $P_{VCE} = P_{init} \times$ імовірність НЕ негайного займання \times імовірність відмови систем \times імовірність віддаленого займання $P_{VCE} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0.8 \cdot 0.1 \cdot 0.2 = 1.6 \cdot 10^{-6}$ подій/рік.

Крок 2: Розрахунок наслідків C за допомогою моделювання *Моделювання витоків та розсіювання*. За допомогою CFD-моделі розраховується, що в навколишньому середовищі утворилася хмара масою 5,000 кг метану, здатна до вибуху.

Моделювання вибуху. За моделлю TNT-еквіваленту розраховується енергія вибуху та прогноуються зони ураження. Розрахунок показує, що надлишковий тиск ударної хвилі перевищить 0.2 бар в радіусі 120 метрів.

Оцінка збитків. В цю зону потрапляє частина компресорної станції. Прямі збитки від руйнування обладнання та опосередковані збитки від простою оцінюються в $C = 40,000,000$ грн.

Крок 3: Розрахунок кінцевого ризику R

$R = P_{VCE} \cdot C = 1.6 \cdot 10^{-6} \cdot 40,000,000 = 64$ грн/рік. Кількісний ризик, пов'язаний зі сценарієм вибуху, становить 64 грн/рік. Ця цифра сама по собі не є великою, але вона дозволяє об'єктивно порівнювати різні ризики. Наприклад, якщо встановлення нової системи виявлення витоків вартістю 200,000 грн знизить імовірність відмови систем до 0.01 в 10 разів, новий ризик складе 6.4 грн/рік. Це дає змогу провести аналіз «витрати-вигоди» Cost-Benefit Analysis та прийняти економічно обгрунтоване рішення щодо інвестицій у безпеку.

Інтеграція ОП з ТБ та ЦЗ. В умовах сучасних викликів, зокрема воєнного стану, традиційна межа між охороною праці, що фокусується на виробничих ризиках, техногенної безпекою (ТБ) та цивільним захистом, що займаються зовнішніми загрозами, практично стирається. Підприємство нафтогазової галузі перестає бути лише місцем роботи; воно перетворюється на потенційне укриття та осередок стійкості для персоналу та, можливо, для місцевої громади. Ця зміна ролі вимагає фундаментального перегляду підходів до управління безпекою та створення єдиної, інтегрованої системи [9, 10].

Концептуальна модель інтегрованої системи управління безпекою. Запропонована концепція передбачає об'єднання трьох ключових компонентів в одну цілісну, синергетичну систему, де кожен елемент підсилює інші (див. Схему 2).

Схема 2



Синергетичний ефект. В рамках цієї моделі, наприклад, система оповіщення про витік газу Техногенна безпека інтегрується із системою оповіщення про повітряну тривогу, Цивільний захист, а навички надання першої допомоги Охорона праці доповнюються елементами тактичної медицини.

Практичні заходи інтеграції. Перехід до інтегрованої моделі вимагає реалізації комплексу практичних заходів, спрямованих на посилення стійкості підприємства (див. Таблицю 9).

Створення такої єдиної, стійкої та адаптивної системи управління безпекою є запорукою не лише збереження життя та здоров'я працівників, але й забезпечення стабільного функціонування стратегічно важливих підприємств нафтогазової галузі в умовах сучасних викликів.

Висновки:

1. Система управління безпекою в нафтогазовій галузі України функціонує в умовах безпрецедентної конвергенції ризиків, традиційних виробничих небезпек, посилених критичним зносом успадкованої інфраструктури, та прямих воєнних загроз, що перетворюють об'єкти на стратегічні цілі. Ця комплексна матриця загроз робить застарілі, реактивні підходи до охорони праці не просто неефективними, а й неприпустимими. Проведене дослідження обгрунтовує, що адекватною відповіддю на ці виклики є фундаментальний перехід до проактивної, ризик-орієнтованої моделі управління. Однак, цей перехід вимагає не лише зміни філософії, а й впровадження науково-обгрунтованих інструментів аналізу. Важливим висновком є необхідність

Ключові напрямки та заходи інтегрованої безпеки

Напрямок	Ключові заходи	Мета та очікуваний результат
Інфраструктура захисту	Проведення аудиту наявних споруд цивільного захисту. Облаштування укриттів відповідно до сучасних вимог: вентиляція, запаси води, медикаменти, автономні джерела живлення та зв'язку	Забезпечення фізичного захисту максимальної кількості персоналу під час повітряних тривог та інших надзвичайних ситуацій
Системи оповіщення та зв'язку	Створення дублюючих, автономних систем оповіщення про повітряну тривогу, хімічну та радіаційну небезпеку. Забезпечення стійкого резервного зв'язку (спутниковий, радіо)	Гарантоване та своєчасне доведення інформації про загрози до всього персоналу, навіть в умовах блекауту чи пошкодження основних мереж
Підготовка персоналу	Проведення регулярних комплексних тренінгів зі сценаріями евакуації, пожежогасіння, надання першої домедичної допомоги з елементами тактичної медицини	Формування у працівників стійких практичних навичок для правильних та скоординованих дій у стресових умовах, мінімізація паніки
Планування та реагування	Розробка та регулярне оновлення чітких, зрозумілих алгоритмів дій, планів, реагування для різних сценаріїв: від ракетного удару до тривалого знеструмлення або кібератаки	Наявність у кожного керівника та працівника чіткого розуміння своєї ролі та послідовності дій, що забезпечує керованість ситуації та мінімізацію наслідків

доповнення якісних оцінок методами кількісного аналізу ризиків QRA, зокрема імовірнісної оцінки, що базується на математичному моделюванні з використанням таких інструментів, як аналіз «дерева відмов» FTA та «дерева подій» ETA. Це дозволяє об'єктивізувати управлінські рішення та оптимізувати розподіл ресурсів на заходи безпеки.

2. Практична реалізація запропонованої сучасної інтегрованої системи безпеки нафтогазової галузі неможлива без глибокої цифрової трансформації. Синергетичне поєднання технологій Індустрії 4.0 створює єдину інтелектуальну екосистему безпеки. Мережа Інтернету речей IoT виступає як система збору первинних даних, що в реальному часі передаються аналітичному ядру на базі штучного інтелекту, яке забезпечує предикативне прогнозування відмов обладнання та моніторинг дотримання процедур. Імерсивні технології VR/AR кардинально підвищують ефективність навчання персоналу та знижують імовірність помилки під час виконання робіт. Апогеєм цієї інтеграції є концепція цифрового двійника, що слугує віртуальним полігоном для всебічного моделювання та аналізу найскладніших аварійних сценаріїв.

3. Ключовим висновком роботи є те, що в сучасних умовах межа між охороною праці, техногенною безпекою та цивільним захистом повністю стирається. Ефективне управління безпекою нафтогазової галузі можливе лише в рамках єдиної інтегрованої системи, яка об'єднує ці три компоненти. Створення такої адаптивної та стійкої моделі, що включає як інженерні засоби контролю виробничих ризиків, так і заходи цивільного захисту від зовнішніх загроз, є безальтернативним шляхом для забезпечення не лише захисту життя та здоров'я працівників, але й гарантування стійкості функціонування стратегічних підприємств, що є критично важливим для енергетичної та національної безпеки України.

Перспективи подальших досліджень. Проведений аналіз сучасних підходів до управління безпекою в нафтогазовій галузі відкриває низку перспективних напрямків для подальших наукових досліджень, спрямованих на поглиблення та практичну імплементацію запропонованих концепцій:

Розробка методології кількісної оцінки інтегрованих ризиків потребує подальшого розроблення комплексних математичних моделей, які б дозволяли кількісно оцінювати не просто окремі ризики, а їхню взаємодію та каскадні ефекти. Особливо актуальним є моделювання сценаріїв, де кібератака або фізичне ураження об'єкта (воєнний ризик) призводить до розвитку великої промислової аварії (техногенний ризик).

Економічне обґрунтування інвестицій у цифрові системи безпеки потребує розроблення чітких моделей розрахунку повернення інвестицій Return on Investment, ROI для комплексних цифрових екосистем IoT + AI + Digital Twins. Такі моделі мають враховувати не лише прямий ефект від запобігання аваріям, але й опосередковані вигоди, як-от підвищення операційної ефективності та зростання стійкості бізнесу.

Формування культури безпеки в умовах тривалого стресу потребує досліджень психологічної стійкості та когнітивних процесів персоналу, що працює в умовах постійної воєнної загрози. Необхідно розробити та валідувати програми психосоціальної підтримки та тренінгів, спрямованих на збереження високого рівня концентрації та адекватного сприйняття ризиків в екстремальних умовах.

Адаптація нормативно-правової бази існуючого законодавства України у сферах охорони праці та цивільного захисту потребує оновлення для адекватної відповіді на нові виклики. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку пропозицій щодо регулювання використання штучного інтелекту в системах безпеки, стандартів для цифрових двійників та формалізації протоколів безпеки для підприємств критичної інфраструктури в умовах воєнного стану.

Список використаних джерел:

1. Річний звіт 2024 / Центр Разумкова. Київ, 2025. URL: <https://razumkov.org.ua/images/2025/06/16/2025-ZVIT-2024-UKR-10-3.pdf>
2. Возняк О. Г. Нафтогазова галузь як чинник енергетичної безпеки та економічного зростання України. *Науковий вісник Львівського державного університету внутрішніх справ*. Серія економічна. 2020. № 2. С. 45–53.
3. Карп І. М., Забіяка І. В. Стратегічні напрями розвитку нафтогазової галузі України в контексті забезпечення енергетичної незалежності. *Економіка та держава*. 2021. № 5. С. 25–30.
4. Завгородній Р., Шмиголь Н. Сучасний стан та проблеми розвитку нафтогазового сектору України. *Підприємництво та інновації*. 2019. № 9. С. 24–30. DOI: <https://doi.org/10.37320/2415-3583/9.3>
5. Енергетична безпека України: методологія системного аналізу та стратегічного планування : аналіт. доп. / О. М. Суходоля та ін. ; за заг. ред. О. М. Суходолі. Київ : НІСД, 2020. 178 с.
6. Погребняк В. Г., Волошин В. С. Екологічна технологія створення водозахисних екранів. Донецьк : Ноулідж, 2010. 482 с.
7. Ахірєй М. М. Підвищення ефективності управління безпекою праці у нафтогазовій промисловості на основі поведінкової безпеки : дис. ... д-ра філософії : 263 / Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро, 2023. 166 с. URL: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/165577>
8. Звіт за результатами вивчення потреб та очікувань заінтересованих сторін щодо імплементації ППВГ в Україні / ППВГ в Україні. 2023. URL: <https://eiti.org.ua/wp-content/uploads/2023/01/Report-as-result-of-needs-and-expectations-identification.pdf>
9. Pogrebnyak V. G., Kondrat O. R., Perkun I. V., Pogrebnyak A. V. Трансформація підходів до безпеки праці та цивільного захисту: виклики та рішення в період дії воєнного стану. *Галузеве машинобудування, будівництво*. 2025. № 1(65). 13 с.
10. Погребняк В. Г., Кондрат О. Р., Перкун І. В., Погребняк А. В. Моделювання професійних і воєнних ризиків в системі безпеки праці та цивільного захисту на об'єктах нафтогазової галузі. *Прикарпатський вісник НТШ*. 2025. № 20(77). 9 с.
11. Polukarov O. I., Prakhovnik N. A., Polukarov Yu. O., Mitiuk L. O., Demchuk H. V. Assessment of occupational risks: New approaches, improvement, and methodology. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. 2021. Vol. 8, no. 11. P. 79–86. DOI: <https://doi.org/10.21833/ijaas.2021.11.011>
12. Шикеринець В. В., Базіняк І. І., Маланюк Т. З. Безпека життєдіяльності : навч.-метод. посіб. Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2022. 30 с.
13. Радецький І. І., Горобинський С. В., Костянян В. Р. та ін. Удосконалення системи управління безпеки виробництва підприємств нафтогазового комплексу. *Нафтова і газова промисловість*. 2012. № 6. С. 16–20.
14. Охорона праці та цивільний захист : підручник / О. Г. Левченко та ін. ; за ред. О. Г. Левченка. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 420 с.
15. Пащенко О. В., Перкун І. В., Погребняк В. Г. Підвищення безпеки праці при проведенні гідро-струминної водополімерної перфорації свердловин. *Системи та технології*. 2025. Vol. 69, no. 1. P. 176–186. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.21>
16. Погребняк В. Г., Чудик І. І., Кондрат О. Р., Перкун І. В., Шиманський В. Я. Реофізика водополімерної перфорації нафтогазових свердловин. Івано-Франківськ : Фоліант, 2025. 308 с.
17. Pogrebnyak A. V., Perkun I. V., Pogrebnyak V. G., Shymanskyi V. Ya. Improvement of labour safety and safety of life activities by increasing the efficiency of water fire extinguishing systems. *Системи та технології*. 2025. Vol. 69, no. 1. P. 187–193. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.22>
18. Ратушняк Г. С., Ободянська О. І. Управління змістом проєктів із забезпечення надійності зовнішніх газорозподільних мереж : монографія. Вінниця, 2014. 130 с.
19. Рибицький І. В. Підвищення ефективності експлуатації газопроводів шляхом удосконалення методів і засобів діагностування їх технічного стану : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.13 / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2021. URL: https://nung.edu.ua/sites/default/files/2021-02/Dis_doc_Rybitsky.pdf
20. Ниркова Л. І., Лісовий П. Є., Гончаренко Л. В., Осадчук С. О., Костін В. А. Закономірності корозійного розтріскування трубної сталі 09Г2С за катодної поляризації в модельному ґрунтовому середовищі. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2021. Т. 22, № 4. С. 828–836. DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.22.4.828-836>
21. Reason J. Managing the Risks of Organizational Accidents. Aldershot : Ashgate, 1997. 252 p. URL: <https://archive.org/details/managingrisksof0000reas>
22. Ярмоленко Ю. О. Теоретичні засади створення платформи агроцифрової кооперації аграрного виробництва. *Ефективна економіка*. 2019. № 2. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.2.64>
23. Вітрик І. В. Цифрова трансформація підприємств нафтогазової промисловості для підвищення ефективності їх діяльності. *Економіка і регіон*. 2024. № 4(95). С. 207–212. DOI: [https://doi.org/10.26906/EiR.2024.4\(95\).3627](https://doi.org/10.26906/EiR.2024.4(95).3627)

24. Луценко В. Р., Пікуля Т. О. Правове забезпечення цифрової трансформації в Україні. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. Серія: Право. 2024. Вип. 81, ч. 1. С. 61–67. DOI: <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2024.81.1.9>

25. Колодяжний М. Г. Стратегія Vision Zero: уроки для України : монографія. Харків : Право, 2022. 300 с.

26. Довбешко С. В., Тольюпа С. В., Шестак Я. В. Застосування методів інтелектуального аналізу даних для побудови систем виявлення атак. *Сучасний захист інформації*. 2019. № 1. С. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2019.010615>

27. Про затвердження Методики оцінювання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру та пожеж : наказ М-ва внутрішніх справ України від 13.10.2023 р. № 836 : зареєстр. в М-ві юстиції України 02.11.2023 р. за № 1905/40961. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1905-23>

28. Карасєва Н. В., Варава І. В. Методи і засоби оцінки ризику здоров'ю населення від забруднення атмосферного повітря : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 56 с. URL: https://apeps.kpi.ua/downloads/%D0%9A%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%94%D0%B2%D0%B0_%D0%92%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%B0_%D0%BE%D1%86%D1%96%D0%BD_%D1%80%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D1%83.pdf

References:

1. Razumkov Centre. (2025). *Richnyi zvit 2024* [Annual report 2024]. Retrieved from: <https://razumkov.org.ua/images/2025/06/16/2025-ZVIT-2024-UKR-10-3.pdf>

2. Vozniak, O. H. (2020). Naftohazova haluz yak chynnyk enerhetychnoi bezpeky ta ekonomichnoho zrostantia Ukrainy [Oil and gas industry as a factor of energy security and economic growth of Ukraine]. *Naukovyi visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu vnutrishnikh sprav. Serii ekonomichna*, (2), 45–53.

3. Karp, I. M., & Zabiika, I. V. (2021). Stratehichni napriamy rozvytku naftohazovoi haluzi Ukrainy v konteksti zabezpechennia enerhetychnoi nezalezhnosti [Strategic directions of development of the oil and gas industry of Ukraine in the context of ensuring energy independence]. *Ekonomika ta derzhava*, (5), 25–30.

4. Zavorodnii, R., & Shmyhol, N. (2019). Suchasnyi stan ta problemy rozvytku naftohazovoho sektoru Ukrainy [Current state and problems of development of the oil and gas sector of Ukraine]. *Pidpriemnytstvo ta innovatsii*, (9), 24–30. <https://doi.org/10.37320/2415-3583/9.3>

5. Sukhodolia, O. M., Kharazishvili, Yu. M., Bobro, D. H., Smenkovskiy, A. Yu., Riabtsev, H. L., & Zavorodnia, S. P. (2020). Enerhetychna bezpeka Ukrainy: metodolohiia systemnoho analizu ta stratehichnoho planuvannia [Energy security of Ukraine: methodology of system analysis and strategic planning] (O. M. Sukhodolia, Ed.). NISD.

6. Pogrebnyak, V. G., & Voloshyn, V. S. (2010). Ekolohichna tekhnolohiia stvorennia vodozakhysnykh ekraniv [Ecological technology for creating water-protective screens]. Noulidzh.

7. Akhirei, M. M. (2023). Pidvyshchennia efektyvnosti upravlinnia bezpekoiu pratsi u naftohazovii promyslovosti na osnovi povedinkovoi bezpeky [Increasing the efficiency of occupational safety management in the oil and gas industry based on behavioral safety] [Doctor of Philosophy dissertation, Dnipro University of Technology]. Retrieved from: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/165577>

8. EITI Ukraine. (2023). Zvit za rezultatamy vyvchennia potreb ta ochikuvan zainteresovanykh storin shchodo implementatsii IPVH v Ukraini [Report on the results of the study of the needs and expectations of stakeholders regarding the implementation of EITI in Ukraine]. Retrieved from: <https://eiti.org.ua/wp-content/uploads/2023/01/Report-as-result-of-needs-and-expectations-identification.pdf>

9. Pogrebnyak, V. G., Kondrat, O. R., Perkun, I. V., & Pogrebnyak, A. V. (2025). Transformatsiia pidkhodiv do bezpeky pratsi ta tsyvilnoho zakhystu: vyklyky ta rishennia v period dii voiennoho stanu [Transformation of approaches to occupational safety and civil protection: challenges and solutions during the martial law]. *Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*, 1(65), 13.

10. Pogrebnyak, V. G., Kondrat, O. R., Perkun, I. V., & Pogrebnyak, A. V. (2025). Modeliuvannia profesiinykh i voiennykh ryzykiv v systemi bezpeky pratsi ta tsyvilnoho zakhystu na ob'ekтах naftohazovoi haluzi [Modeling of occupational and military risks in the system of occupational safety and civil protection at oil and gas industry facilities]. *Prykarpatskyi visnyk NTSH*, (20/77), 9.

11. Polukarov, O. I., Prakhovnik, N. A., Polukarov, Yu. O., Mitiuk, L. O., & Demchuk, H. V. (2021). Assessment of occupational risks: New approaches, improvement, and methodology. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 8(11), 79–86. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2021.11.011>

12. Shykerynets, V. V., Baziniak, I. I., & Malaniuk, T. Z. (2022). *Bezpeka zhyttiediialnosti* [Life safety]. Vasyl Stefanyk Precarpathian National University.

13. Radetskyi, I. I., Horobynskyi, S. V., & Kostanian, V. R. (2012). Udoshkonalennia systemy upravlinnia bezpeky vyrobnytstva pidpriemstv naftohazovoho kompleksu [Improvement of the production safety management system of oil and gas complex enterprises]. *Naftova i hazova promyslovist*, (6), 16–20.

-
14. Levchenko, O. H., Polukarov, O. I., Zatsarnyi, V. V., Polukarov, Yu. O., & Zemlianska, O. V. (2019). Okhorona pratsi ta tsyvilnyi zakhyst [Occupational safety and civil protection] (O. H. Levchenko, Ed.). Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
15. Pashchenko, O. V., Perkun, I. V., & Pogrebnyak, V. G. (2025). Pidvyshchennia bezpeky pratsi pry provedenni hidrostrumynnoi vodopolimernoї perforatsii sverdlodyn [Increasing labor safety during hydro-jet water-polymer perforation of wells]. *Systemy ta tekhnolohii*, 69(1), 176–186. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.21>
16. Pogrebnyak, V. G., Chudyk, I. I., Kondrat, O. R., Perkun, I. V., & Shymanskyi, V. Ya. (2025). *Reofizyka vodopolimernoї perforatsii naftohazovykh sverdlodyn* [Rheophysics of water-polymer perforation of oil and gas wells]. Foliant.
17. Pogrebnyak, A. V., Perkun, I. V., Pogrebnyak, V. G., & Shymanskyi, V. Ya. (2025). Improvement of labour safety and safety of life activities by increasing the efficiency of water fire extinguishing systems. *Systemy ta tekhnolohii*, 69(1), 187–193. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.22>
18. Ratushniak, H. S., & Obodianska, O. I. (2014). *Upravlinnia zmistom proektiv iz zabezpechennia nadiinosti zovnishnikh hazorozpodilnykh merezh* [Content management of projects to ensure the reliability of external gas distribution networks]. Vinnitsia.
19. Rybitskyi, I. V. (2021). *Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii hazoprovodiv shliakhom udoskonalennia metodiv i zasobiv diahnostuvannia yikh tekhnichnoho stanu* [Improving the efficiency of gas pipeline operation by improving methods and means of diagnosing their technical condition] [Doctoral dissertation, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas]. Retrieved from: https://nung.edu.ua/sites/default/files/2021-02/Dis_doc_Rybitsky.pdf
20. Nyrkova, L. I., Lisovyi, P. E., Goncharenko, L. V., Osadchuk, S. O., & Kostin, V. A. (2021). Regularities of stress-corrosion cracking of pipe steel 09G2S at cathodic polarization in a model soil environment. *Physics and Chemistry of Solid State*, 22(4), 828–836. <https://doi.org/10.15330/pcss.22.4.828-836>
21. Reason, J. (1997). *Managing the risks of organizational accidents*. Ashgate. Retrieved from: <https://archive.org/details/managingrisksofo0000reas>
22. Yarmolenko, Yu. O. (2019). Teoretychni zasady stvorennia platformy ahrotsyfrovoi kooperatsii ahrarnoho vyrobnytstva [Theoretical principles of creating a platform for agro-digital cooperation of agricultural production]. *Efektivna ekonomika*, (2). <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.2.64>
23. Vitryk, I. V. (2024). Tsyfrova transformatsiia pidpriemstv naftohazovoi promyslovosti dlia pidvyshchennia efektyvnosti yikh diialnosti [Digital transformation of oil and gas companies to improve their performance]. *Ekonomika i rehion*, (4/95), 207–212. [https://doi.org/10.26906/EiR.2024.4\(95\).3627](https://doi.org/10.26906/EiR.2024.4(95).3627)
24. Lutsenko, V. R., & Pikulia, T. O. (2024). Pravove zabezpechennia tsyfrovoi transformatsii v Ukraini [Legal support for digital transformation in Ukraine]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu. Seriya Pravo*, 81(1), 61–67. <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2024.81.1.9>
25. Kolodiazhnyi, M. H. (2022). Stratehiia Vision Zero: uroky dlia Ukrainy [Strategy Vision Zero: lessons for Ukraine]. Pravo.
26. Dovbeshko, S. V., Toliupa, S. V., & Shestak, Ya. V. (2019). Zastosuvannia metodiv intelektualnoho analizu danykh dlia pobudovy system vyivlennia atak [Application of data mining methods for building attack detection systems]. *Suchasnyi zakhyst informatsii*, (1), 6–15. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2019.010615>
27. Ministry of Internal Affairs of Ukraine. (2023). *Pro zatverdzhennia Metodyky otsiniuvannia ryzykiv vynyknennia nadzvychnykh sytuatsii tekhnohennoho kharakteru ta pozhezh* [On approval of the Methodology for assessing risks of man-made emergencies and fires] (Order No. 836). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1905-23>
28. Karaieva, N. V., & Varava, I. V. (2018). Metody i zasoby otsinky ryzyku zdoroviu naselennia vid zabrudnennia atmosfernoho povitria [Methods and means of assessing the risk to public health from air pollution]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Retrieved from: https://apeps.kpi.ua/downloads/%D0%9A%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%94%D0%B2%D0%B0_%D0%92%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%B0_%D0%BE%D1%86%D1%96%D0%BD_%D1%80%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D1%83.pdf

Дата першого надходження статті до видання: 02.12.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

Роздобудько Е. В., кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри економіки, менеджменту та туристичного бізнесу
Дніпровського інституту ПрАТ
«ВНЗ «Міжрегіональна Академія управління персоналом»
ORCID: 0000-0001-9724-0120

Стеблюк Н. Ф., кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри міжнародного туризму та готельно-ресторанного
бізнесу Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-4488-769X

Кучер М. М., кандидат економічних наук, доцент,
завідувач кафедри міжнародного туризму
та готельно-ресторанного бізнесу
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-3868-5311

Данилишин В. С., здобувач вищої освіти,
Національного університету «Львівська Політехніка»

АДАПТАЦІЯ ТА СТІЙКІСТЬ МАЛОФОРМАТНОГО РИТЕЙЛУ: СТРАТЕГІЧНІ ПІДХОДИ В УМОВАХ КРИЗОВИХ ТРАНСФОРМАЦІЙ

У статті проаналізовано пріоритетні стратегічні підходи до розвитку компанії роздрібно-продовольчої торгівлі в умовах повномасштабної військової агресії в Україні, зокрема на тлі зростаючої конкуренції, зниження купівельної спроможності населення та деструкції логістичних ланцюгів. Досліджено динаміку ключових макроекономічних індикаторів, включаючи кількість суб'єктів господарювання, обсяги доходів від реалізації та чистий прибуток у сфері роздрібно-торгівлі продуктами харчування за період 2013–2023 років. Проаналізовано ключові чинники, що вплинули на розвиток ринку, серед яких особливу роль відіграли повномасштабне вторгнення у 2022 році, втрата частини ринку на окупованих територіях, зміна поведінки споживача та географічна переорієнтація бізнесу.

На основі аналізу встановлено високу волатильність сектору та необхідність структурної трансформації, зокрема, географічної переорієнтації бізнесу. Обґрунтовано стратегічну необхідність переорієнтації ритейлу на малі населені пункти та сільську місцевість, що обумовлено стабільним попитом на базові товари та обмеженою присутністю мережевих операторів. У цьому контексті запропоновано стратегію адаптації продовольчих мереж через розширення малоформатного ритейлу («магазин біля дому»), яка передбачає відкриття компактних торгових точок з оптимізованим асортиментом, ціноутворенням, орієнтованим на цінність, та мінімальними операційними витратами. Наведено поетапну організаційно-структурну схему малоформатних торговельних закладів з акцентом на локальну гнучкість, цифрову підтримку (аналітика, чат-боти) та соціальну функцію магазину в громаді. Запропонована структура, крім економічної доцільності, забезпечує реалізацію корпоративної соціальної функції, спрямованої на гарантований доступ населення до базових товарів у соціально вразливих регіонах. Отримані результати можуть слугувати практичним орієнтиром для суб'єктів господарювання, що прагнуть адаптуватися до реальних умов часу.

Ключові слова: стратегія розвитку, диверсифікація, бізнес, продукто́вий ритейл, мережевий ритейл, продовольча безпека, криза.

Rozdobudko E. V., Stebliuk N. F., Kucher M. M., Danilyshyn V. S. Adaptation and resilience of small-format retail: strategic approaches in times of crisis transformations

The article analyzes priority strategic approaches to the development of retail food trade companies in the context of full-scale military aggression in Ukraine, particularly against the backdrop of growing competition, declining purchasing power of the population, and the destruction of logistics chains. The dynamics of key macroeconomic indicators, including the number of economic entities, sales revenue, and net profit in the food retail sector for the period 2013–2023, are examined. The key factors that influenced the development of the market were analyzed, among which the full-scale invasion in 2022, the loss of part of the market in the occupied territories, changes in consumer behavior, and the geographical reorientation of business played



a special role. Based on the analysis, the high volatility of the sector and the need for structural transformation, in particular, the geographical reorientation of the business, were established. The strategic need to reorient retail towards small towns and rural areas is justified by the stable demand for basic goods and the limited presence of chain operators. In this context, a strategy for adapting food chains by expanding micro-retail formats (“neighborhood stores”) is proposed, which involves opening compact retail outlets with an optimized product range, value-oriented pricing, and minimal operating costs. A step-by-step organizational and structural diagram of small-format retail outlets is provided, with an emphasis on local flexibility, digital support (analytics, chatbots), and the social function of the store in the community. In addition to economic feasibility, the proposed structure ensures the implementation of a corporate social function aimed at guaranteeing the population’s access to basic goods in socially vulnerable regions. The results obtained can serve as a practical guideline for economic entities seeking to adapt to the real conditions of the time.

Key words: development strategy, diversification, business, food retail, chain retail, food security, crisis.

Постановка проблеми. В умовах війни в Україні та посилення внутрішньої міграції виникає потреба в розширенні діяльності саме в контексті місцевого рівня, що актуалізує диверсифікацію діяльності продуктового ритейлу. У відповідь на ці зміни продуктовим ритейлерам доцільно реалізовувати активне розширення географії присутності та відкриття «магазинів біля дому» саме в невеликих містах та селах. Такий підхід дозволить не лише задовольнити попит нових локальних споживчих аудиторій, але й сприятиме соціально-економічному розвитку громад. Саме тому дослідження стратегії розвитку продуктового ритейлу в умовах соціально-економічних змін є вкрай актуальним для більш детального розгляду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових праць, опублікованих українськими вченими, демонструє глибоке усвідомлення необхідності закриття прогалів у наукових дослідженнях, що описують діяльність галузі в цих екстремальних умовах. Особливий інтерес становлять малі формати роздрібної торгівлі, відомі як «магазини біля дому». Останні функціонують у середовищі високої логістичної вразливості, мають обмежений доступ до капіталу та вимагають надзвичайно швидкої асортиментної та операційної адаптації. Важливість даного формату для забезпечення продовольчої безпеки на локальному рівні робить їх критичним об’єктом для вивчення стратегій стійкості та переорієнтації асортименту на регіональну специфіку та встановлення коротких ланцюгів поставок [1, 2].

Основна увага в наукових роботах [3, 4] приділяється таким тенденціям, як концентрація ринку, диверсифікація форматів магазинів, діджиталізація та розвиток омніканальності. Такий підхід сприяє підвищенню продуктивності комерційних операцій, мінімізації транзакційних витрат і створенню умов для сталого розвитку підприємства в умовах конкурентного середовища.

Дослідження науковців [5] сфокусоване на адаптивних стратегіях підприємств в умовах воєнного стану. В роботі визначено ключові напрями змін: кризове управління, реінжиніринг логістики та необхідність гнучкого управління ресурсами для забезпечення стійкості. В статті Цурської Б. [6] наведено обґрунтування зміни формату підприємств ритейлу під впливом макро-маркетингового середовища, що підтверджує перехід споживчого попиту до локалізованих точок продажу. Наведена теза корелюється з довоснісними дослідженнями [3, 7], які вже тоді відзначали зростання популярності малих форматів і необхідність диверсифікації. Таким чином, війна лише активізувала раніше наявну тенденцію [8]. Саме тому розробка та аналіз операційної схеми «магазину біля дому» становить особливий науковий інтерес та є практичним внеском даного дослідження.

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні стратегічних підходів до адаптації та стійкості продуктового ритейлу в умовах економічної нестабільності та війни в Україні.

Виклад основного матеріалу дослідження. У сучасних умовах глобалізації економіки, посилення конкуренції та динамічних змін у законодавчому середовищі, питання стратегічного розвитку підприємств набувають особливої актуальності. Виживання та довгостроковий успіх суб’єктів господарювання значною мірою залежать від їх здатності адаптуватися до нових викликів, ефективно використовувати ресурси, формувати конкурентні переваги та водночас діяти у межах правового поля.

В роботі проаналізовано загальні тенденції розвитку компаній в Україні на ринку продуктового ритейлу (рис. 1).

Аналіз даних, представлених на рис. 1, демонструє коливальну динаміку кількості суб’єктів господарювання, що є прямим наслідком дії множини різноманітних зовнішніх та внутрішніх чинників. Особливо значне скорочення кількості компаній було зафіксовано у 2022 році внаслідок початку повномасштабної військової агресії. Водночас варто відзначити, що в 2023 році кількість компаній знову зросла, що свідчить про відновлення підприємницької активності, переорієнтацію бізнесу на безпечні регіони, появу нових моделей локального підприємництва, а також спробу закрити потреби там, де торговельна інфраструктура зазнала суттєвих втрат та зниження ефективності.

Далі пропонується дослідити вплив війни та умов ринку на обсяги реалізації на ринку продуктового ритейлу (рис. 2).

Динаміка доходів у сегменті продуктового ритейлу протягом 2013–2023 років характеризується значною нестабільністю з чергуванням періодів зростання та різких спадів. Така ситуація детермінована впливом

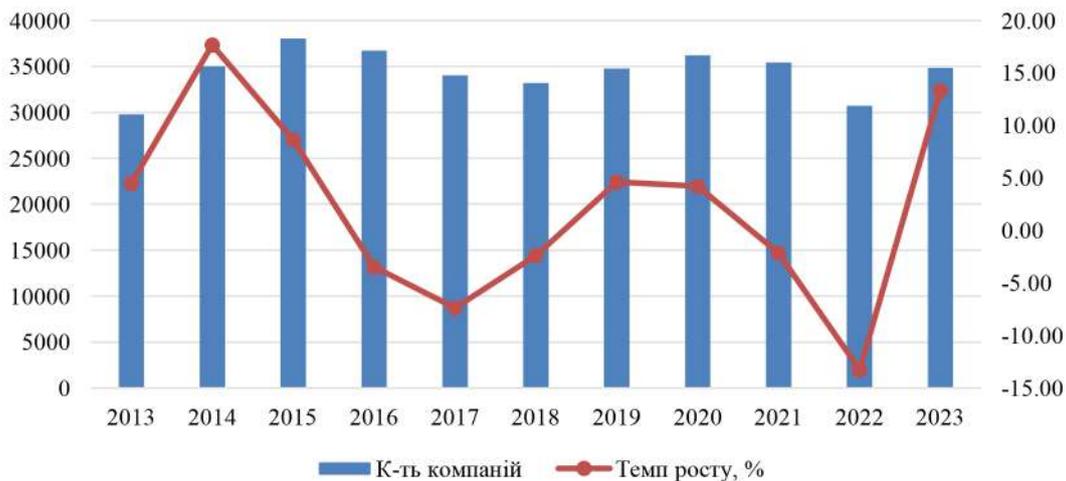


Рис. 1. Динаміка кількості компаній в Україні на ринку продуктового ритейлу (КВЕД 47.2) в період 2013–2023 рр., одиниць

Джерело: [9]

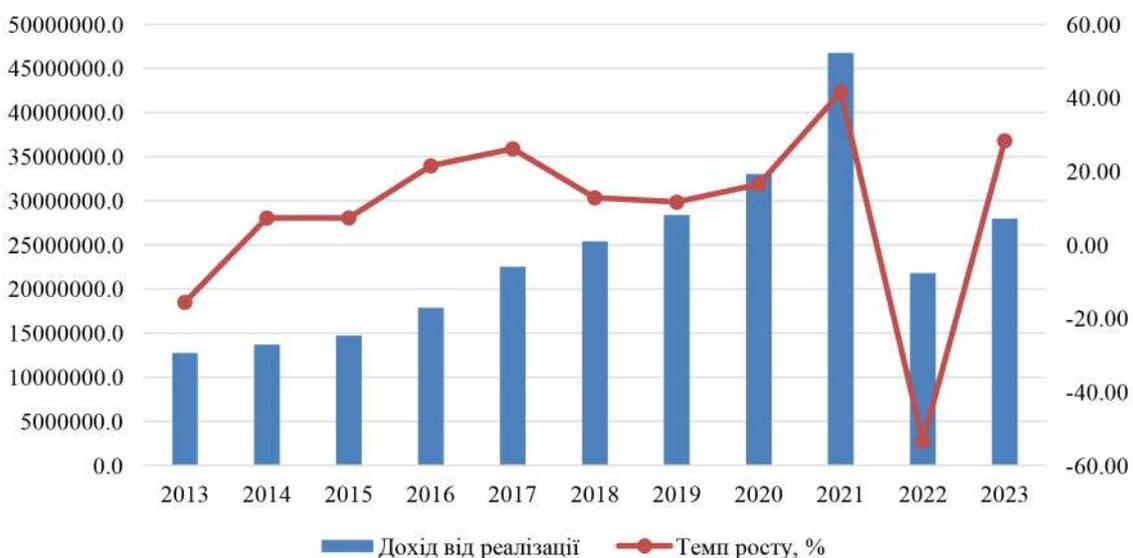


Рис. 2. Динаміка обсягів доходу від реалізації компаній на ринку продуктового ритейлу (КВЕД 47.2) в Україні в період 2013–2023 рр., тис. грн.

Джерело: [9, 10]

як економічної, так і політичної кон'юнктури в країні. Після суттєвого спаду, зафіксованого у 2013 році, ринок демонстрував поступове відновлення. У період з 2016 по 2021 роки спостерігалось стійке зростання показників доходів, що відображало як стабілізацію споживчого попиту, так і інтенсивний розвиток торговельних мереж.

Піковий ріст у 2021 році (збільшення на 41,6 %) змінився глибоким провалом у 2022-му (зменшення на 53,4 %) через війну, втрату частини ринку та логістичні порушення. Станом на 2023 р. ринок почав відновлюватися, що свідчить про адаптаційний потенціал галузі. Для подальшої стратегії важливо не орієнтуватись лише на великі міста, а змішувати акценти на малі населені пункти з високим попитом і низькою конкуренцією. Чистий прибуток виступає ключовим індикатором ефективності функціонування суб'єктів продуктового ритейлу, а його динаміка детально відображена на рис. 3.

Аналіз показників вказує на високу волатильність сектору, що формувався в умовах постійних криз та адаптації, адже після різкого провалу у 2013 році (збитки понад 100 млн грн) почалося поступове відновлення ринку з 2016 року. Періоди зростання чергувались із новими хвилями спаду, що свідчить про нестійкість прибутковості навіть при зростанні доходів. Найвищих показників чистого прибутку було досягнуто у 2021 році, однак уже в 2022 році війна спричинила падіння майже на 50 %. Щодо 2023, то ринок частково компенсував втрати, що вказує на адаптацію бізнесу до нових реалій і ефективні внутрішні трансформації.

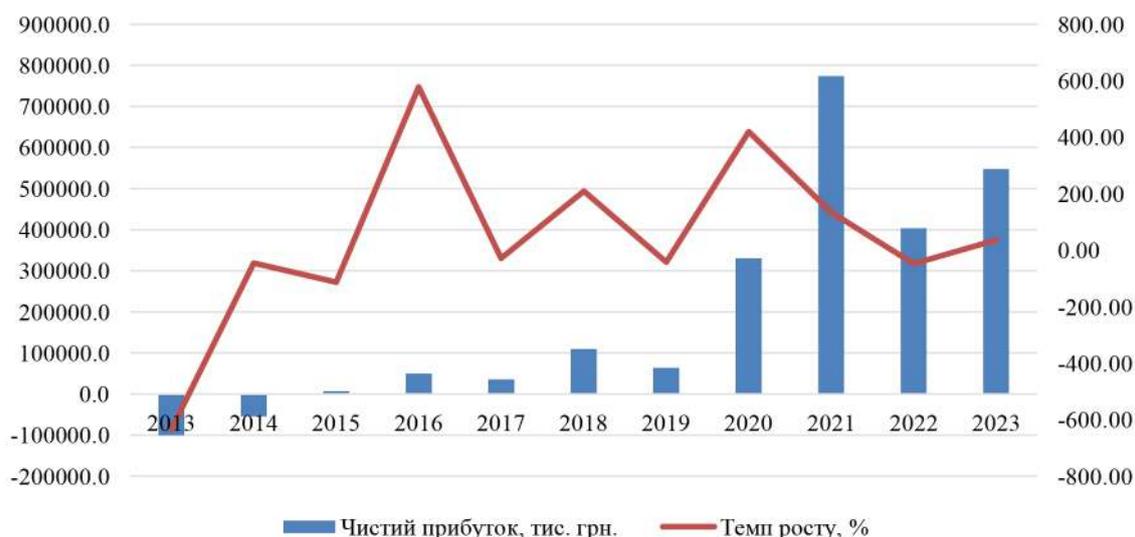


Рис. 3. Динаміка чистого прибутку компаній на ринку продуктового ритейлу (КВЕД 47.2) в Україні в період 2013–2023 рр., тис. грн.

Джерело: [9, 10]

Аналіз ринку продуктового ритейлу та загальних показників компаній вказує на зміну акцентів у розвитку галузі, адже в умовах війни, економічної нестабільності та посилення конкуренції з боку великих мереж, стратегія подальшого розвитку повинна базуватись на гнучкості, локальній адаптації та соціальній орієнтації. Особливу увагу слід приділити розширенню присутності в малих населених пунктах та сільській місцевості, де часто відсутні магазини з повним асортиментом, а попит на доступні продукти стабільний, що потребує запуску невеликих, мобільних або модульних торгових точок, які легко відкривати та масштабувати [11].

Загалом, ринок потребує не просто розширення, а цілеспрямованої реорганізації з урахуванням нових реалій. Успіх залежить від здатності компаній швидко адаптуватись до змін, обирати правильні точки росту в недооцінених локаціях, зберігати лояльність споживача і стабільну присутність навіть у складних умовах. Тому одним із ключових стратегічних напрямів компаній є розширення продуктових мереж за рахунок запуску форматів «магазини біля дому» у малих селищах та у невеликих містах. У поєднанні із фізичним розширенням, важливою складовою стратегії залишається цифрова трансформація. Остання дозволяє посилити мультимедіальну взаємодію та зворотний зв'язок із цільовою аудиторією [11]. З метою підтримки клієнтів у режимі 24/7 рекомендовано впровадження інтелектуального чат-бота, який має функціональну спроможність своєчасно надавати інформацію щодо актуальної наявності товарів, інформувати про поточні маркетингові акції, а також здійснювати автоматизоване вирішення типових клієнтських запитів. Основні шляхи реалізації стратегії розвитку продуктового ритейлу наведено на рис. 4.

Отже, синергія фізичного розширення продуктових мереж у таких форматах з цифровими інструментами дозволить компаніям забезпечити гнучку, стійку та клієнтоорієнтовану модель розвитку, яка відповідає сучасним викликам воєнного часу.

Слід відзначити, що шляхи реалізації стратегії розвитку продуктового ритейлу в умовах війни та зміненої структури споживчого попиту передбачають поетапне впровадження дій, спрямованих на охоплення нових ринків, адаптацію до економічної реальності та зміцнення позицій на локальному рівні. Першим кроком є розширення присутності на ринку через запуск торгових точок у форматах «магазини біля дому», що передбачає відкриття магазинів із компактним, оптимальним асортиментом, спеціально адаптованих під потреби малих населених пунктів і сільської місцевості, де традиційні великі формати є малоефективними або недоцільними. Схематичне зображення структури таких форматів наведено на рис. 5.

Першим етапом роботи є оцінка потенціалу локації, яка передбачає аналіз рівня конкуренції, чисельності населення, логістичної доступності та попиту на базові товари, що дозволить виявити недооцінені регіони, де присутність продуктового ритейлу або недостатня, або взагалі відсутня.

Наступним кроком є вибір приміщення, адже для таких форматів не потрібні великі площі, а достатньо компактного торгового простору з низькими витратами на оренду та утримання, що дасть змогу зменшити стартові інвестиції й швидше досягати точки беззбитковості. Відповідно до обмеженої площі формується асортимент, який включає лише найнеобхідніші продукти харчування, товари щоденного вжитку, базову побутову хімію, а також товари місцевого виробництва або товари під власною торговою маркою. Такий підхід дозволяє забезпечити баланс між товарною наповненістю і швидкою оборотністю запасів.



Рис. 4. Шляхи реалізації стратегії розвитку продуктового ритейлу в умовах війни та споживчого попиту
Джерело: узагальнено авторами на основі [6, 7]

Центральне місце у організаційно-структурній схемі малоформатних торговельних закладів посідає реалізація стратегії ціноутворення, орієнтовану на цінність і платоспроможність споживача. Це вимагає гнучкого підходу до закупівель, перегляду товарних позицій та розвитку власних торгових марок як інструменту цінової доступності. Необхідно оперативно реагувати на поведінку покупця, адже у змінному середовищі важливо регулярно проводити аналіз попиту, виявляти зміни у споживчих звичках та відповідно коригувати асортимент та цінову політику [12].

Важливим елементом також є логістика, адже замість щоденних поставок потрібно сформувати оптимізовану схему доставки з центрального складу, що дозволить економити на транспортуванні й ефективно планувати товарні запаси. Крім того, застосування омніканальних підходів до роботи, включаючи гнучкі графіки та ротації між регіонами, дозволяє оптимізувати використання наявних людських ресурсів [13].

Щодо асортименту, то необхідно адаптувати його до локального попиту. Постійний моніторинг продажів та зворотний зв'язок із споживачами дозволяє оперативно реагувати на зміну потреб і вподобань населення, що забезпечує мінімізацію товарних залишків та підвищує оборотність капіталу. Графік роботи магазинів доцільно адаптувати під особливості громади, що дозволить забезпечити зручність для клієнтів та ефективність для бізнесу. Ще одним важливим фактором є залучення місцевої громади через партнерство з виробниками, участь у локальних ініціативах та запровадження програм лояльності. На завершальному етапі передбачено постійний моніторинг фінансових показників, обсягів продажів, витрат, структури чека, що дасть змогу оперативно вносити корективи, підвищувати ефективність та масштабувати бізнес на інші регіони. Для суб'єкта ритейлу реалізація вищезазначеного підходу надає можливість експансії ринкової присутності із мінімальними операційними та капітальними витратами. З метою систематизації вищезазначених стратегічних переваг у таблиці 1 представлено зіставлення ключових факторів доцільності відкриття торговельних точок у малонаселених регіонах та відповідних ризиків.

Таким чином, за умови ефективної мінімізації ризиків, відкриття «магазинів біля дому» є стратегічно необхідним кроком для забезпечення стійкого розвитку продуктового ритейлу.

Реалізація вищенаведених підходів забезпечить як стабільність у короткостроковій перспективі, так і довгострокове зростання продуктового ритейлу через глибше проникнення на нові ринки, підвищення лояльності споживачів та зміцнення конкурентної позиції в умовах кризи.

Висновки. Ринок продуктового ритейлу в Україні потребує адаптивної стратегії розвитку, яка відповідатиме реаліям воєнного часу, зниженій купівельній спроможності населення та структурним змінам у споживчій поведінці. Проаналізовані показники свідчать про нестабільність доходів і прибутковості галузі, що зумовлює необхідність пошуку нових напрямів зростання, зокрема через вихід на регіональні ринки з недостатнім рівнем торгової інфраструктури. Відкриття магазинів невеликого формату («магазин біля дому») з оптимальним, орієнтованим на місцеві потреби асортиментом дозволить охопити малі міста й села, де попит на базові товари зберігається стабільним, але доступ до них є обмеженим. Слід відмітити, стратегія розвитку, що базується на локальній орієнтації, соціальній чутливості та технологічній гнучкості, здатна не лише забезпечити стабільність продуктового ритейлу у воєнний період, а й сформувати підґрунтя для сталого зростання.

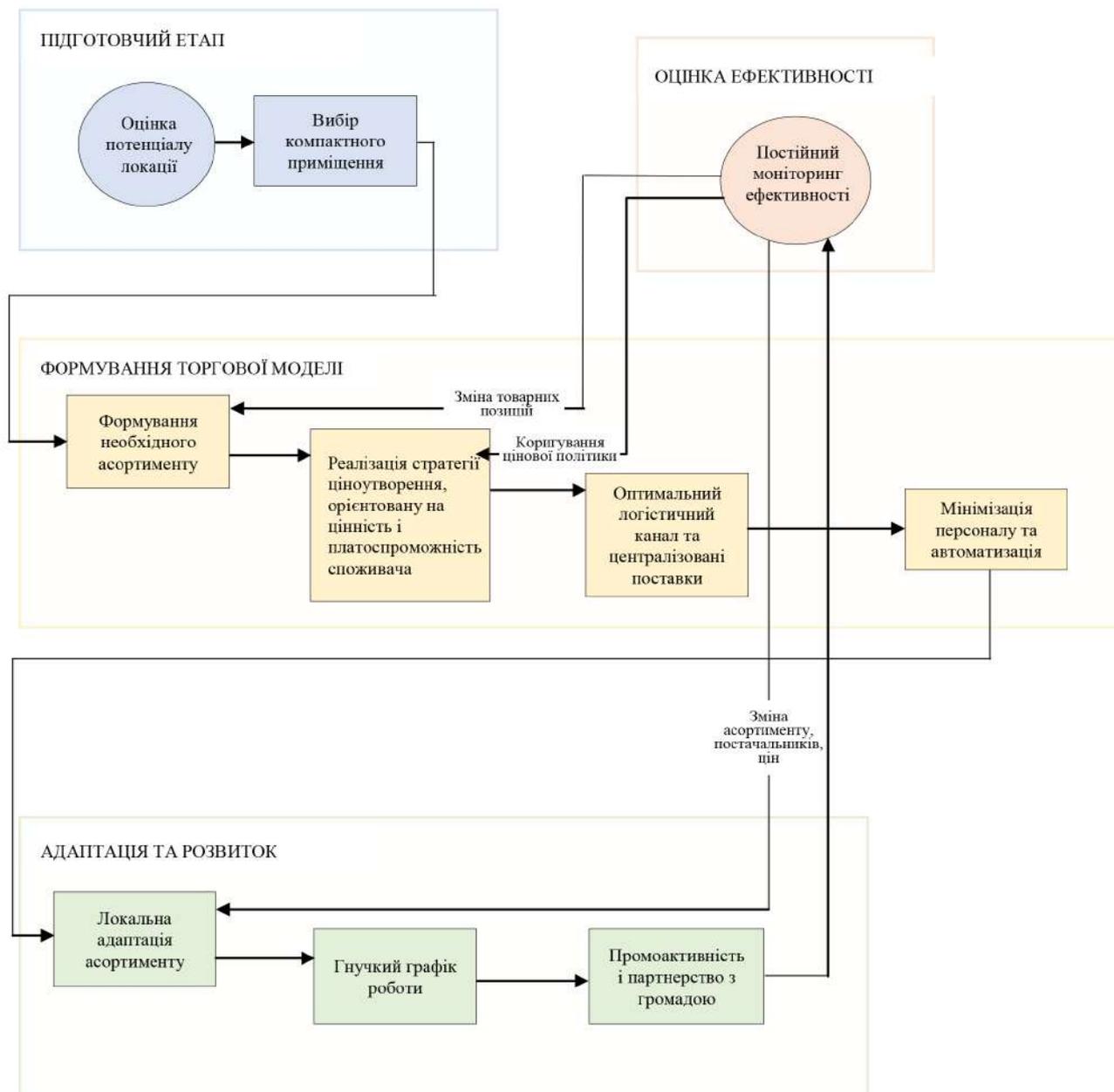


Рис. 5. Схематичне зображення структури малоформатної продуктової торгівлі

Джерело: узагальнено авторами на основі [5, 7, 8]

Таблиця 1

Зіставлення переваг та ризиків стратегії відкриття «магазинів біля дому»

Доцільність відкриття	Ризики відкриття
Ненасичений ринок та менша конкуренція	Нижчий обсяг продажів
Підвищення лояльності споживачів	Збільшення логістичних витрат
Нижчі операційні витрати	Інфраструктурні обмеження
Соціальна відповідальність та імідж	Купівельна спроможність
Розширення ринкової частки	Безпекові ризики
Мінімізація капітальних витрат	Обмежені можливості для маркетингових ініціатив

Джерело: [5, 7]

Розробка ефективних логістичних маршрутів та оптимальних стратегій постачання для малих торговельних точок є стратегічною необхідністю та елементом корпоративної соціальної відповідальності в умовах повоєнного відновлення. Проте, реалізація цієї задачі вимагає від суб'єктів господарювання високої операційної гнучкості, раціоналізації логістичних процесів, адаптації формату, готовність до врахування локальних особливостей територій та оперативне реагування на системні та ситуативні виклики. Подальші дослідження мають бути спрямовані на обґрунтування сценаріїв розвитку роздрібного продуктового бізнесу в умовах кризових трансформацій із застосуванням економіко-математичного моделювання та оцінкою ймовірності їх реалізації.

Список використаних джерел:

1. Наумова Т., Кирильсва Л., Лемешко Я. Трансформація ринку мережевого ритейлу України в умовах глобальних криз та війни. *Економіка та суспільство*, (56). 2023. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-136>
2. Олійник Т., Іванова М. Розвиток ритейлу в Україні. *Молодий вчений*, 1 (125), 2024. С. 126–129. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2024-1-125-1>
3. Миколайчук І. П., Силкіна Ю. О. Сучасні тренди розвитку мережевого ритейлу в Україні. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Економічні науки*, (57), 2019. С. 39–46. <https://doi.org/10.36477/2522-1205-2019-57-06>
4. Боліла С. Інноваційні підходи та новітні технології в вирішенні завдань в сфері ритейлу як чинник досягнення конкурентних переваг. *Таврійський науковий вісник. Серія: Економіка*, (20), 2024. С. 51–60. <https://doi.org/10.32782/2708-0366/2024.20.6>
5. Бугайчук В., Кривульський Є., Глюза К. Формування стратегії розвитку підприємства в умовах війни. *Економіка та суспільство*. 2023. (56). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-81>
6. Цурська Б. Зміни формату підприємств ритейлу під впливом факторів макро-маркетингового середовища. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Економічні науки*. 312(6(2)), 2022. С. 150–159. [https://doi.org/10.31891/2307-5740-2022-312-6\(2\)-27](https://doi.org/10.31891/2307-5740-2022-312-6(2)-27)
7. Сак Т., Грицюк, Н. Ринок ритейлу в Україні: тенденції та перспективи розвитку в умовах кризи. *Економічний часопис Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки*, 2(22), 2020. С. 33–42. <https://doi.org/10.29038/2411-4014-2020-02-33-42>
8. Височин І. В. Адаптивний розвиток мережевого ритейлу в умовах євроінтеграції України. *Економіка і суспільство*. 2023. Вип. № 51. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-51-48/>
9. Економічна статистика / Економічна діяльність / Діяльність підприємств. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/sze_20.htm
10. Держстат України. Офіційний сайт Державної служби статистики України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/>
11. Ритейл у цифрах: Історичний рекорд обсягу доходу та топ-20 «незламних» мереж. URL: <https://mind.ua/publications/20274946-ritejl-u-cifrah-istorichnij-rekord-obsyagu-dohodu-ta-top-20-nezlamnih-merezh>
12. Стеблюк Н. Ф., Волосова Н. М. Використання економіко – математичного моделювання для оптимізації бізнес – процесів організації. *Review of transport economics and management*. 2021. Вип. 6 (22). С. 117–123.
13. Шапка І. Ринок ритейлу в Україні: аналіз поточного стану та перспективи розвитку в умовах трансформаційної економіки. *Економіка та суспільство*, (72). 2025. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-72-165>

References:

1. Naumova, T., Kyrylieva, L., Lemeshko, Ya. (2023). Transformatsiia rynku merezhevoho ryteilu Ukrainy v umovakh hlobalnykh kryz ta viiny [Transformation of the Ukrainian network retail market in the context of global crises and war]. *Ekonomika ta suspilstvo*, (56). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-136>
2. Oliinyk, T., & Ivanova, M. (2024). Rozvytok ryteilu v Ukraini [Development of retail in Ukraine]. *Molodyi vchenyi*, 1 (125), S. 126–129. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2024-1-125-1>
3. Mykolaichuk, I. P., Sylkina, Yu. O. (2019). Suchasni trendy rozvytku merezhevoho ryteilu v Ukraini [Modern trends in the development of network retail in Ukraine]. *Visnyk Lvivskoho torhovelno-ekonomichnoho universytetu. Ekonomichni nauky*, (57), S. 39–46. <https://doi.org/10.36477/2522-1205-2019-57-06>
4. Bolila, S. Innovatsiini pidkhody ta novitni tekhnolohii v vyrishenni zavdan v sferi ryteilu yak chynnyk dosiahnennia konkurentnykh perevah [Innovative approaches and new technologies in solving problems in the retail sector as a factor in achieving competitive advantages]. *Tavriyskyi naukovyi visnyk. Serii: Ekonomika*, (20), 2024. S. 51–60. <https://doi.org/10.32782/2708-0366/2024.20.6>
5. Buhaichuk, V., Kryvulskyi, Ye., Hliuza, K. (2023). Formuvannia stratehii rozvytku pidpriemstva v umovakh viiny [Formation of the enterprise development strategy in wartime conditions]. *Ekonomika ta suspilstvo*. (56). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-81>

-
6. Tsurska, B. (2022). Zminy formatu pidpriemstv ryteilu pid vplyvom faktoriv makro-marketyrnovoho seredovyshcha [Changes in the format of retail enterprises under the influence of macro-marketing]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. Serii: Ekonomichni nauky. 312(6(2), S.150–159. [https://doi.org/10.31891/2307-5740-2022-312-6\(2\)-27](https://doi.org/10.31891/2307-5740-2022-312-6(2)-27)
7. Sak, T., Hrytsiuk, N. (2020). Rynok ryteilu v Ukraini: tendentsii ta perspektyvy rozvytku v umovakh kryzy [Retail market in Ukraine: trends and prospects for development in crisis conditions]. *Ekonomichni chasopys Skhidnoevropeiskoho natsionalnoho universytetu imeni Lesi Ukrainky*, 2(22), S. 33–42. <https://doi.org/10.29038/2411-4014-2020-02-33-42>
8. Vysochyn, I. V. (2023). Adaptivnyi rozvytok merezhevoho ryteilu v umovakh yevrointehratsii Ukrainy [Adaptive development of network retail in the context of Ukraine's European integration]. *Ekonomika i suspilstvo*. Vyp. № 51. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-51-48/>
9. Ekonomichna statystyka / Ekonomichna diialnist / Diialnist pidpriemstv [Economic statistics / Economic activity / Enterprise activity]. Retrieved from: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/sze_20.htm
10. Derzhstat Ukrainy [State Statistics Service of Ukraine]. Ofitsiinyi sait Derzhavnoi sluzhby statystyky Ukrainy. Retrieved from: <https://www.ukrstat.gov.ua/>
11. Ryteil u tsyfrakh: Istorychnyi rekord obsiahu dokhodu ta top-20 “nezlamnykh” merezh [Retail in figures: Historical record of revenue and top 20 “unbreakable” chains]. Retrieved from: <https://mind.ua/publications/20274946-ritejl-u-cifrah-istorichnij-rekord-obsyagu-dohodu-ta-top-20- nezlamnih-merezh>
12. Stebliuk, N. F., Volosova, N. M. (2021). Vykorystannia ekonomiko – matematychnoho modeliuвання dlia optymizatsii biznes – protsesiv orhanizatsii [Using economic and mathematical modeling to optimize business processes of the organization]. *Review of transport economics and management*. Vyp. 6 (22). S. 117–123.
13. Shapka, I. (2025). Rynok ryteilu v Ukraini: analiz potochnoho stanu ta perspektyvy rozvytku v umovakh transformatsiinoi ekonomiky [Retail market in Ukraine: analysis of the current state and development prospects in the context of a transformational economy]. *Ekonomika ta suspilstvo*, (72). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-72-165>

Дата першого надходження статті до видання: 30.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.614.32:621.642.03

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2026-1-71.23>

Дрожжин О. Л., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри експлуатації флоту і технології морський
перевезень
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0002-9695-9296

Берестенко В. В., доктор філософії,
доцент кафедри експлуатації флоту і технології морський
перевезень
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0002-4094-9179.

ФЛЕКСІТАНКИ В ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕВЕЗЕННЯ «BAG-IN-BOX»: ПОТОЧЕННЯ ТЕРМІНУ НА БАЗІ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ РОЛІ

Стаття присвячена дослідженню місця та функціональної ролі флексітанків (FT) у технології контейнерних перевезень «bag-in-box» (BIB). Актуальність роботи зумовлена зростаючою часткою контейнеризації на світовому транспортному ринку та активним пошуком більш гнучких і економічних рішень для доставки рідких вантажів. Поява FT як альтернативи традиційним танк-контейнерам у 1970-х роках відкрила нові можливості для логістики харчових продуктів, хімічних речовин та інших безпечних рідин, однак водночас поставила низку питань щодо правового визначення їхнього статусу. Зокрема, в міжнародній практиці немає однозначного тлумачення щодо віднесення FT до пакувальних матеріалів, чи розгляду їх як допоміжне контейнерне обладнання.

Метою дослідження є уточнення терміну «флексітанк» на основі його функціонального призначення, а також аналіз наслідків віднесення цієї категорії до термінів «упаковка» чи «контейнерне обладнання» у практиці страхування, митного оформлення. Базою для дослідження було визначення елементів технології BIB з міжнародних стандартів і конвенцій, практичні кейси судових справ. У статті детально охарактеризовано технологічні аспекти системи BIB, доведена функціональна залежність FT від контейнерного обладнання, що унеможливує його використання як самостійного транспортного резервуара. За допомогою аналізу правових норм і судових рішень доведено, що FT не можуть розглядатися як упаковка, адже для виконання своєї ролі вони потребують контейнера і виступають саме допоміжним обладнанням. Наукова новизна полягає у пропозиції чіткого термінологічного розмежування: визначення FT як еластичної цистерни, яка встановлюється в універсальному вантажному контейнері та виконує роль додаткового обладнання. Такий підхід дозволяє зняти низку суперечностей у сфері страхування та митного оформлення, а також є підставою для чіткого розмежування прав і обов'язків між учасниками інтермодальних перевезень. Результати дослідження мають прикладне значення для інтермодальних, експедиторських, лінійних і страхових компаній, перевізників та вантажовласників, оскільки дають змогу оптимізувати договірні відносини, знизити ризики судових спорів і забезпечити прозорість процедур в інтермодальних перевезеннях наливних вантажів. Практичні рекомендації, наведені у висновках, спрямовані на підвищення безпеки й ефективності транспортування наливних вантажів, а також на уніфікацію термінології у транспортній сфері.

Ключові слова: флексі-танк, контейнер, інтермодальні перевезення, транспортні системи, лінійне судноплавство, транспортні технології, контейнерні перевезення.

Drozhzhyn O. L., Berestenko V. V. Flexitanks in bag-in-box transportation technology: term revision based on functional role

This article is devoted to researching the place and functional role of flexitanks (FT) in bag-in-box (BIB) container transport technology. The relevance of this work is due to the growing share of containerization in the global transport market and the active search for more flexible and economical solutions for the delivery of liquid cargo. The development of FT as an alternative to traditional tank containers in the 1970s opened up new opportunities for the logistics of food products, chemicals, and other safe liquids, but at the same time raised a number of questions regarding the legal definition of their status. In particular, there



© О. Л. Дрожжин, В. В. Берестенко, 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

is no clear interpretation in international practice as to whether FTs should be classified as packaging materials or considered as supplementary container equipment.

The purpose of the study is to clarify the term “flexitank” based on its functional purpose, as well as to analyze the consequences of classifying this category under the terms ‘packaging’ or “container equipment” in insurance and customs clearance practices. The basis for the study was the definition of the elements of BIB technology from international standards and conventions, as well as practical case studies of legal cases. The article describes in detail the technological aspects of the BIB system and proves the functional dependence of FT on container equipment, which makes it impossible to use it as an independent transport tank. Through analysis of legal norms and court decisions, it has been proven that FTs cannot be considered packaging, since they require a container to perform their role and are therefore auxiliary equipment. The scientific novelty lies in the proposal of a clear terminological distinction: defining FT as an elastic tank that is installed in a universal cargo container and acts as additional equipment. This approach allows for the removal of a number of contradictions in the field of insurance and customs clearance, and also provides a basis for a clear distinction between the rights and obligations of participants in intermodal transport. The results of the study are of practical importance for intermodal, freight forwarding, shipping, and insurance companies, carriers, and cargo owners, as they enable the optimization of contractual relationships, reduce the risk of litigation, and ensure transparency in intermodal bulk cargo transportation procedures. The practice recommendations in the conclusions are meant to make bulk cargo transportation safer and more efficient, as well as to standardize transportation terminology.

Key words: flexitank, container, intermodal transport, transport systems, liner shipping, transportation technologies, container transportation.

Постановка проблеми. З появою контейнерних перевезень в 1956 р. та їх подальшою стрімкою диверсифікацією контейнерна транспортно-технологічна система перебуває у стані постійних зовнішніх викликів і реагує на них змінами і перетвореннями. Контейнерна технологія, утворена від початку як технологічний засіб міжтранспортного перевезення високоартісних товарів, представлених у вигляді генеральних і тарно-штучних вантажів, спочатку взяла на себе майже увесь обсяг міжнародної торгівлі такими товарами, таким чином витіснивши флот універсальних суховантажних суден (3,6 % валового дедвейту світового флоту, середній вік суден – 28 р. [1]) а згодом й значно розширила власну вантажну базу, залучивши до контейнеризації традиційно «балкерні» (насіпні і навалювальні, в тому числі зернові) і наливні вантажі. Перші спроби створення інструментів, які б технологічно задовольняли перевезення малих партій наливних вантажів контейнерами, полягали в створенні коштовного спеціального контейнерного обладнання – ISO танк-контейнерів, здатних перевозити як небезпечні, так й безпечні хімічні речовини: харчові продукти, зріджені гази, нафту і нафтопродукти. Приймаючи до уваги складність і специфічності самої технології, ризики, які пов’язані із перевезенням в ISO-танках, суворі вимоги міжнародних регламентів, відповідний сервісний ринок зайняло 240 міжнародних танк-контейнерних операторів (ТСО), які оперують в 2025 р. майже від 619,7 тис. TEU танк-контейнерів з 882 тис. TEU світового обладнання [2].

В 1970-х як альтернатива перевезенню наливних в танк-контейнерах з’являється технологія навантаження рідин в FT, а вже на початку 1980-х з’являються перші статті з цієї технології [3–5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Більшість вітчизняних публікацій щодо перевезень у FT мають аналітичний чи оглядовий характер: [12–16], організаційні особливості доставки розглянуто в [17]. В основному сучасні статті з дослідження технології перевезення у FT стосуються визначення оптимального об’єму наповнення FT [6], вивченню температурної поведінки нагрівальної панелі у FT, при застосуванні для перевезення вантажів, які потребують підігріву [7–8], дослідженню властивостей матеріалу FT [9], вимог щодо матеріалів їх виготовлення [10].

Постановка проблеми. Попри широке поширення технології перевезення ВІВ, в міжнародній практиці залишається невизначеним правовий статус флексітанків (FT): у різних документах та судових рішеннях їх відносять то до пакувальних матеріалів, то до допоміжного контейнерного обладнання. Така термінологічна неоднозначність призводить до труднощів у правовому регулюванні, страхуванні, митному оформленні та організації договірних відносин між учасниками інтермодальних перевезень. Відсутність уніфікованого визначення поняття «флексітанк» у міжнародних стандартах і нормативних актах знижує ефективність практичного застосування технології ВІВ та створює ризики для учасників транспортного процесу.

Мета статті полягала в уточненні терміну «флексітанк» на основі аналізу його функціональної ролі у технології контейнерних перевезень bag-in-box та обґрунтування доцільності віднесення флексітанків до категорії допоміжного контейнерного обладнання через аналіз як технологічних, та правових аспектів експлуатації флексітанків.

Опис технології bag-in-box (ВІВ). Сучасні FT являють собою спеціальні одноразові багатощарові еластичні резервуари, які виготовляються з полімерних матеріалів високої міцності. Технологія передбачає монтування таких резервуарів всередині стандартного 20-футового ISO-контейнера за участю технічних засобів (їх елементи 1-5 наведено на рис. 1) з наступною послідовністю операцій:

1. підготовка контейнера: здійснюється технічний огляд, очищення контейнерного обладнання, зсередини металеві стінки контейнера оздоблюються захисними панелями (1), що запобігає механічному пошкодженню FT (2) під час транспортування;

2. монтаж FT: резервуар у складеному вигляді розташовується всередині контейнера та фіксується за допомогою спеціальної системи кріплення. В дверному отворі контейнеру встановлюють щит і поперечні балки (3), які прийматимуть на себе тиск від вантажу під час перевезення. Монтаж ввiдбувається за iнструкцiями виробника досвiдченим персоналом.;

3. навантаження вiдбувається через поступове наповнення FT рiдиною через клапан резервуару. Наповнення вiдбувається iз зачиненим лiвим дверем (4); клапан (5) знаходиться навпроти вiдкритої правої дверi. Об'єм завантаження зазвичай становить вiд 16 до 24 тис. л). FT має заповнюватися iз контрольованою швидкiстю, рекомендується використовувати засоби захисту вiд розливу. Жодна частина FT, опорних брус-кiв або перегородки не має торкатися дверей у повнiстю завантаженому станi;

4. герметизацiя: наповнений FT закривається таким чином, щоб забезпечити захист вантажу вiд зовнiшнього впливу i унеможливити протiкання. На лiвiй дверi розмiщується попереджувальна налiпка: «Всерединi – навантажений FT, лiву частину дверi не вiдчиняти!» [11]. Пiсля завантаження контейнер має бути зважений для визначення ваги фактично навантаженої рiдини;

5. транспортування (завантажений контейнер транспортується стандартними видами транспорту (залiзничним, автомобiльним, морським) чи iх комбiнацiями);

6. розвантаження (реалiзується за допомогою насосного обладнання через спеціальний клапан, пiсля чого використаний FT має бути утилізований).

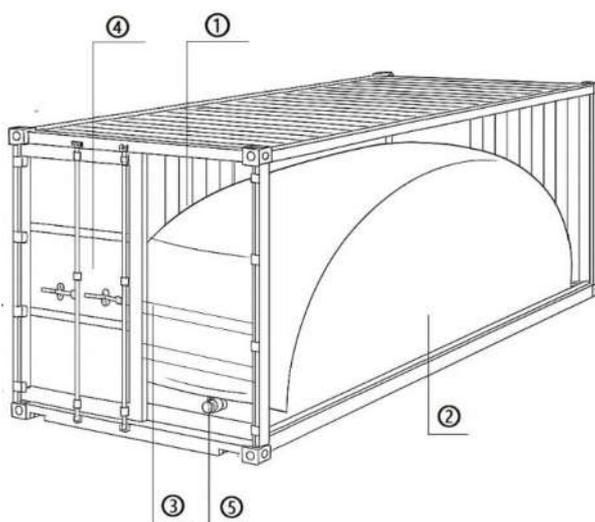


Рис. 1. Основні елементи технології ВiВ

Функціональна роль FT в ВiВ-технології. В більшості випадків перевезень в контейнерах вантажовласники користуються контейнерним обладнанням, яке знаходиться у власності перевізника (СОС – carrier owned container). Оскільки саме перевізники видають коносаменти, в стандартних умовах більшості коносаментів є визначення: «товар» – вантаж або його частина, а також будь-яка упаковка, прийнята вiд вiдправника, i включає в себе будь-які контейнери, що не були надані перевiзником або вiд його iменi [26]. Таким чином, FT вiднесенi до товару, оскільки перевiзником за СОС надається тiльки ISO-контейнер (рис. 2).

В практицi мiжнародних перевезень вiдповiдно до Генерального договору страхування передбачено страхове вiдшкодування при настаннi подiй, якi вiдносяться до страхових випадкiв, наслiдком яких є обов'язок страховика здiйснити страхову виплату (страхове вiдшкодування або страхову суму). До страхових випадкiв вiдносяться й витiк чи розлив вантажу, який перевозився за допомогою FT у контейнерi, оскільки Генеральний договiр оформлюється на увесь спектр майнових iнтересiв, вантажiв або ризикiв, що виникають у певної органiзацiї протягом визначеного перiоду.

Договором було визначено, що страховик не здiйснює виплату страхового вiдшкодування, якщо збитки чи втрата викликанi недостатнiстю або непридатнiстю упаковки застрахованого вантажу або пiдготовки його до транспортування, недотриманням правил завантаження, розвантаження, укладки, закрiплення, складування вантажiв встановленим правилами i нормам, та вiдправленням вантажiв в ушкодженному станi. Вiдповiдно до умов договору страхування, страховою компанiєю до пакування застрахованого вантажу включено й контейнерне обладнання. FT не був прямо передбачений як вид упаковки, але непридатна або пошкоджена упаковка пiдпадали пiд виключення зi страхових випадкiв. Власне на цiй пiдставi i виник спiр мiж сторонами.

Експедитор, який виступав за договором як страховальник, доводив в судi, що страхова компанiя безпiдставно вiдмовила у страховiй виплатi, вважаючи контейнер, а вiдповiдно i FT, упаковкою товару. Пiдставою для такої позицiї став звiт сюрвейера в порту перевалки, у якому був зафiксований факт пошкодження

Основні визначення «контейнер», «флексітанк», «упаковка»

1. Контейнер		
1.1	вантажний контейнер (freight container) – транспортний засіб, який: а) має постійний характер і, відповідно, є достатньо міцним для багаторазового використання; б) спеціально розроблений для полегшення перевезення вантажів одним або декількома видами транспорту без проміжного перепакування; в) оснащений пристроями, що дозволяють легко його обробляти, зокрема переносити з одного виду транспорту на інший; г) розроблений таким чином, щоб його було легко пакувати/наповнювати та спорожняти; д) має внутрішній об'єм не менше 1 м. (Примітка 1 до позиції: Термін «вантажний контейнер» не включає транспортні засоби та звичайну тару. Примітка 2 до позиції: Також відомий як морський контейнер – «shipping container»)	[19]
1.2	«Контейнер» означає предмет транспортного обладнання: а) що має постійний характер і, відповідно, є досить міцним, щоб бути придатним для багаторазового використання; б) спеціально сконструйований для полегшення перевезення вантажів одним або кількома видами транспорту без проміжного перевантаження; с) сконструйований з урахуванням необхідності закріплення та (або) легкої обробки й для цього обладнаний кутовими фітингами; d) такого розміру, що площа, яка знаходиться між чотирма зовнішніми нижніми кутами, складає: і) не менше 14 кв.м (150 кв. футів) або ii) не менше 7 кв.м (75 кв. футів), якщо його обладнано верхніми кутовими фітингами; термін «контейнер» не включає ні транспортних засобів, ні пакування; однак він поширюється на контейнери, коли вони перевозяться на шасі	[18]
FT		
2.1	FT – це великий мішок або резервуар, встановлений всередині контейнера для перевезення безпечних рідин	[20]
2.2	FT повинні бути встановлені в 20-футових контейнерах GP, розрахованих на мінімальну вагу брутто 30480 кг. Контейнер повинен відповідати вимогам ISO 1496:2013 Частина 1 та мати дійсну табличку з сертифікатом безпеки CSC	
	Флексітанк-система (flexitank system) – система, що використовується для перевезення рідких вантажів, яка складається з FT, системи пристроїв кріплення (restraining system), GP (general purpose) вантажного контейнера, і, якщо потрібно, допоміжного обладнання	[21]
Упаковка		
3.1	3.1.1 упаковка <як виріб> виріб, що використовується для вміщення, захисту, обробки, доставки, зберігання, транспортування та презентації товарів, від сировини до готової продукції, від виробника до користувача або споживача, включаючи переробника, складальника або іншого посередника; 3.1.2 пакування <як операція> операції, пов'язані з підготовкою товарів до зберігання, захисту, обробки, доставки, зберігання, транспортування та представлення	[25]
3.2	Під упаковкою розуміють усі вироби, виготовлені з будь-яких матеріалів будь-якої природи, що використовуються для зберігання, захисту, транспортування, доставки та представлення товарів, від сировини до готової продукції, від виробника до користувача або споживача	[26]

FT та часткова втрата товару. FT зазвичай є предметом окремої угоди та самостійним видом товару, який ввозиться на територію України в режимі «тимчасового ввезення», оскільки не виробляється в Україні.

Так, у описаній вище справі під час здійснення митного контролю, FT був ввезений згідно вантажної митної декларації на територію України саме як «допоміжне пристосування для морських контейнерів для транспортування наливних вантажів разом з контейнером», що дозволило застосувати положення Конвенції про тимчасове ввезення від 26.06.1990 р. [22].

Одеська регіональна торгово-промислова палата на запит заявника-експедитора надала роз'яснення, що термін «упаковка», згаданий у Конвенції [22] пункт b). означає «усі вироби та матеріали, які служать або призначені служити у тому стані, в якому вони ввозяться, для упакування, захисту, розміщення і кріплення або розділення товарів, за винятком пакувальних матеріалів, таких як солома, папір, скловолокно, стружка тощо, у разі, якщо товари ввозяться навалом. Виключення становлять також контейнери і піддони, які визначені відповідно до ст. 1 такими у пунктах с і d. Отже, контейнер «флексітанк» та інше обладнання не може бути визнано упаковкою.

Відповідно до визначень, наведених в табл. 1, FT – це еластична цистерна, що створена для встановлення всередині універсального вантажного контейнера, є його допоміжним пристосуванням, виготовлена зі спеціальних полімерних матеріалів, які використовуються для транспортування наливних вантажів у контейнерах.

Верховний Суд також вже висловлював позицію, за якою, виходячи зі сфери застосування, опису та функціонального використання, FT, як зворотне допоміжне обладнання, яке встановлюється у 20-ти футових універсальних контейнерах, є додатковим пристосуванням та обладнанням контейнерів і не відповідає ознакам упаковки.

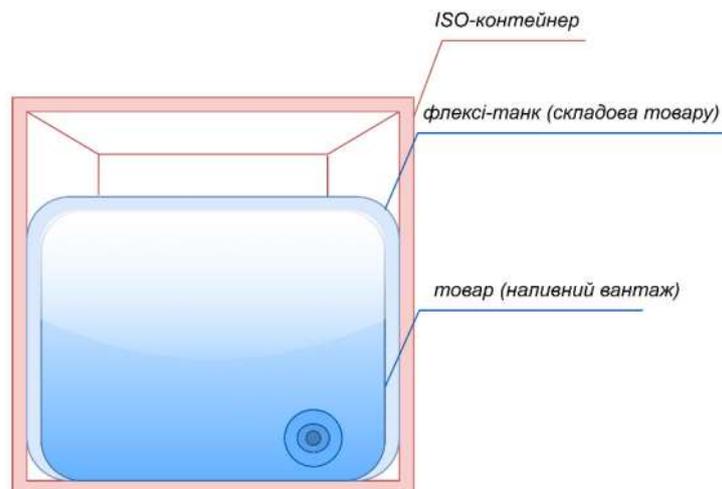


Рис. 2. FT як складова товару (вантажу)

Постанови Верховного Суду від 16 лютого 2021 р. у справі № 324/580/17 [23] та від 11 листопада 2022 р. у справі № 324/579/17 [24] підтверджують, що спеціально призначені для перевезення наливних вантажів у 20-ти футових морських контейнерах FT не можуть бути використаними в якості незалежного транспортного резервуара в будь-якій формі. Під час безтарного перевезення рідини, FT не може бути використаний без 20-ти футового контейнера, так само як і 20-ти футовий контейнер для з метою перевезення наливних в безтарній формі не може бути використаним без FT. Таким чином встановлено, що основною ознакою упаковки є те, що вона служить або призначена служити у тому стані, в якому вона ввозиться на митну територію України, та придатна для використання за призначенням без допомоги або застосування будь-яких інших предметів, речей, виробів тощо. На підставі викладеного FT неможна відносити до упаковки.

Таким чином, FT розглядаються як допоміжне контейнерне обладнання (рис. 3).

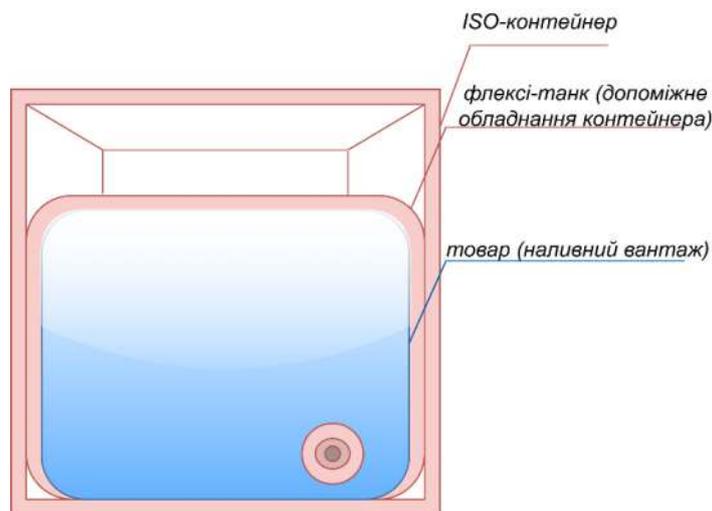


Рис. 3. FT як допоміжне контейнерне обладнання для перевезення наливних вантажів

Суд у наведеній вище справі, оцінивши наявні докази, дійшов висновку про наявність страхового випадку та обов'язку страхової компанії виплатити страхове відшкодування, а також штрафні санкції за затримку у його виплаті, погодившись із позицією експедитора, що FT не відповідає визначенню «упаковка».

Висновки. Відповідно до наведених визначень і практики розгляду судових справ увага експедиторів (в тому числі, таких, які діють як договірні перевізники) мають:

- узгоджувати обсяги власної відповідальності перед відправником та враховувати відповідні виключення;
- при укладанні договорів страхування узгоджувати обсяги відповідальності страховика та звертати увагу на визначення термінів «пакування», «упаковка», «контейнери»;
- у випадку, якщо пошкодження упаковки є виключенням зі страхових випадків, виключати «контейнер» і «флексітанк» із переліку пакування товару;

– фіксувати не лише тільки факт втрати товару чи пошкодження FT, а й встановлювати причини та за можливості час і місце події.

Якщо вже укладений договір відносить FT до пакування, серед практичних рекомендацій є залучення сюрвейера під час завантаження FT для документального підтвердження його належного стану або за можливості фіксувати в транспортних документах ремарки наступного змісту: «флексітанк перевірений, придатний для перевезення, пошкоджень чи слідів протікання не виявлено». Бажано також прямо вказувати у відповідних документів, «товар перевозиться наливом, без упаковки».

Список використаних джерел:

1. Review of Maritime Transport 2024 (UNCTAD/RMT/2024). United Nations publication. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024_en.pdf (дата звернення: 02.09.2025).
2. 2025 Global Tank Container Fleet-Survey. ITCO. URL: https://international-tank-container.org/storage/uploads/ITCO_2025_Global_Fleet_Report_update_100325.pdf (дата звернення: 02.09.2025).
3. Phillips F. E. UK flexitank operator Unispeed eyes the world. *Containerisation International*. 1983. Vol. 17, No. 10, Oct., pp. 44–45.
4. Complementing the tank. *Hazardous Cargo Bulletin*. 1984. Vol. 5, No. 7, Jul., pp. 21–22.
5. Tingle R. Flexitanks – future markets in the bag? *Cargo Systems*. 1987. Vol. 14, No. 8, pp. 61, 63, 65.
6. Muhammad Haidir Hamdan, Nofrizalidris Darlis, Yong Tze Mi, Izuan Amin Ishak, Syabillah Sulaiman, Md Norrizam Mohamad Ja'at, ... Muhamad Mohsheim Hashim. Hydrodynamics Analysis on Liquid Bulk Transportation with Different Driving Cycle Conditions. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2022. Vol. 100, No. 1, pp. 137–151. DOI: <https://doi.org/10.37934/arfmts.100.1.137151>
7. Azam S. R. S., Darlis N., Mustafa A., Azahar M. A. R., Sadun A. S. B., Hassan O. A., Taib I., Mustafa K. N., Hashim M. M. CFD Analysis of the Effect of Heat Distribution on Different Heating Pad Piping Arrangements for Flexitank Application. *CFD Letters*. 2023. Vol. 15, No. 2, pp. 1–15. DOI: [10.37934/cfdl.15.2.115](https://doi.org/10.37934/cfdl.15.2.115)
8. Ahmad Jahid N. H. A., Abu Hassan O., Mohd Shah N. S., Muhammad Razif M. R., Sadun A. S., Darlis N., ... Mustafa, K. N. Evaluation of Heating Pad using Electrical Heating Element for Flexitank Transportation Application. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*. 2024. Vol. 123, No. 1, pp. 31–43. DOI: <https://doi.org/10.37934/aram.123.1.3143>
9. Chow E., Armstrong R. Improving performance of bulk packaging of liquids through the use of modified ethylene vinyl alcohol (EVOH). SPE 2012 Polyolefins and FlexPack Conference. Society of Plastics Engineers, 2012.
10. Bartz A. Playing by the rules. *Industrial Fabric Products Review*. 2003. Vol. 88, No. 5, pp. 42–46.
11. United Nations Economic Commission for Europe, Working Party on Intermodal Transport and Logistics, & Consulting, E. *Informal meeting on Code of Practice for Packing of Cargo Transport Units*. 2022. URL: https://unece.org/sites/default/files/2022-07/Flexitanks_CTU-Code_2022_second-informal-meeting_7a.pdf (дата звернення: 02.09.2025).
12. Берестов І. В., Колісник А. В., Пестременко-Скрипка О. С., Богачук Д. П. Обґрунтування доцільності транспортування соняшникової олії з використанням флексітанків у системі інтермодальних перевезень. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. Т. 28, № 2. С. 81–87.
13. Продашук С. М., Кім К. В., Водолажська А. А. Інноваційні технології перевезення наливних вантажів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 3 (дод.). С. 52–53.
14. Прейгер Д., Жаліло Я., Собкевич О., Смелянова О. Реалізація транзитного потенціалу України як фактор зміцнення економічних зв'язків між Європою та Азією. *Економіка України*. 2012. № 4. С. 47–59. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/EkUk_2012_4_7 (дата звернення: 02.09.2025).
15. Харсун Л. Ефективність логістики сільськогосподарської продукції як фактор підвищення її конкурентоспроможності. *Товари і ринки*. 2018. № 1. С. 168–179.
16. Пономарчук В. Є., Мормітко В. Г. Реалії втілення та розвитку стратегії переробки олійних культур промисловою групою «ВІОЙЛ». *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*. Серія: Технічні науки. 2015. Вип. 1(2). С. 117–125. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpvnutn_2015_1\(2\)_23](http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpvnutn_2015_1(2)_23) (дата звернення: 02.09.2025).
17. Вишневська О. Д., Вишневський Д. О., Онищенко С. П. Організаційні особливості доставки вантажів з використанням флексітанків. *Розвиток транспорту*. 2023. Вип. 2. С. 105–118. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.09>.
18. Міжнародна конвенція про безпечні контейнери. Офіційний вебпортал Верховної Ради України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_013#Text (дата звернення: 02.09.2025).
19. ISO 830:2024 – Freight containers – Vocabulary. iTeh Standards. 2025, September 13. URL: <https://standards.itih.ai/catalog/standards/iso/f367fdb6-01ca-416a-9004-66e4e8910394/iso-830-2024> (дата звернення: 02.09.2025).
20. Container Owners Association. Code of Practice – Flexitank Operators. Code of practice V6-O 07.2019. URL: <https://www.containerownersassociation.com/wp-content/uploads/2018/03/COA-Flexitank-Code-of-Practice-V6-O-Operators-07.2019a.pdf> (дата звернення: 02.09.2025).

-
21. PAS 1008:2016. Specification for the performance and testing of a single-use flexitank. BSI Standards Limited, 2016. ISBN 9780580920240.
 22. Конвенція про тимчасове ввезення. Офіційний вебпортал Верховної Ради України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_472#Text (дата звернення: 02.09.2025).
 23. Верховний Суд України. Справа № 324/580/17 (2-а/324/25/2017) від 16.02.2021. Касаційне провадження № К/9901/37109/18. URL: <https://reyestr.court.gov.ua/Review/95010422> (дата звернення: 02.09.2025).
 24. Верховний Суд України. Справа № 324/579/17 (2-а/324/24/2017) від 11.11.2022. Касаційне провадження № К/9901/35182/18. URL: <https://reyestr.court.gov.ua/Review/107291146> (дата звернення: 02.09.2025).
 25. ISO 21067-1:2016 – Packaging – Vocabulary – Part 1: General terms. iTeh Standards. 2023, July 22. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/8b83cad2-aa2c-4ecc-854e-7b676c7d1cc8/iso-21067-1-2016> (дата звернення: 02.09.2025).
 26. Packaging. European Environment Agency. URL: <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/packaging> (дата звернення: 02.09.2025).
 27. Maersk. Terms for carriage. URL: <https://terms.maersk.com/carriage> (дата звернення: 02.09.2025).

References:

1. United Nations Conference on Trade and Development. (2024). *Review of maritime transport 2024 (UNCTAD/RMT/2024)*. United Nations. Retrieved from: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024_en.pdf
2. International Tank Container Organisation. (2025). *2025 global tank container fleet survey*. ITCO. Retrieved from: https://international-tank-container.org/storage/uploads/ITCO_2025_Global_Fleet_Report_update_100325.pdf
3. Phillips, F. E. (1983, October). UK flexitank operator Unispeed eyes the world. *Containerisation International*, 17(10), 44–45.
4. Complementing the tank. (1984, July). *Hazardous Cargo Bulletin*, 5(7), 21–22.
5. Tingle, R. (1987). Flexitanks – future markets in the bag? *Cargo Systems*, 14(8), 61, 63, 65.
6. Hamdan, M. H., Darlis, N., Mi, Y. T., Ishak, I. A., Sulaiman, S., Ja'at, M. N. M., ... Hashim, M. M. (2022). Hydrodynamics analysis on liquid bulk transportation with different driving cycle conditions. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 100(1), 137–151. <https://doi.org/10.37934/arfmts.100.1.137151>
7. Azam, S. R. S., Darlis, N., Mustaffa, N., Azahar, M. A. R., Sadun, A. S. B., Hassan, O. A., Taib, I., Mustaffa, K. N., & Hashim, M. M. (2023). CFD analysis of the effect of heat distribution on different heating pad piping arrangements for flexitank application. *CFD Letters*, 15(2), 1–15. <https://doi.org/10.37934/cfdl.15.2.115>
8. Jahid, N. H. A., Hassan, O. A., Shah, N. S. M., Razif, M. R. M., Sadun, A. S., Darlis, N., ... Mustafa, K. N. (2024). Evaluation of heating pad using electrical heating element for flexitank transportation application. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, 123(1), 31–43. <https://doi.org/10.37934/aram.123.1.3143>
9. Chow, E., & Armstrong, R. (2012). Improving performance of bulk packaging of liquids through the use of modified ethylene vinyl alcohol (EVOH). In *SPE 2012 Polyolefins and FlexPack Conference*. Society of Plastics Engineers.
10. Bartz, A. (2003). Playing by the rules. *Industrial Fabric Products Review*, 88(5), 42–46.
11. United Nations Economic Commission for Europe, Working Party on Intermodal Transport and Logistics. (2022). *Informal meeting on code of practice for packing of cargo transport units*. UNECE. Retrieved from: https://unece.org/sites/default/files/2022-07/Flexitanks_CTU-Code_2022_second-informal-meeting_7a.pdf
12. Berestov, I. V. Ya., Kolisnyk, A. V., Pestremenko-Skrypka, O. S., & Bohachuk, D. P. (2023). Justification of the feasibility of sunflower oil transportation using flexitanks in the system of intermodal transportation. *Information and Control Systems on Railway Transport*, 28(2), 81–87.
13. Prodashchuk, S. M., Kim, K. V., & Vodolazhaska, A. A. (2023). Innovative technologies for liquid cargo transportation. *Information and Control Systems on Railway Transport*, 3(Suppl.), 52–53.
14. Preyher, D., Zhalilo, Y., Sobkevych, O., & Yemelianova, O. (2012). Realization of Ukraine's transit potential as a factor of strengthening economic ties between Europe and Asia. *Ekonomika Ukrainy*, 4, 47–59. http://nbuv.gov.ua/UJRN/EkUk_2012_4_7
15. Kharsun, L. (2018). Efficiency of agricultural logistics as a factor of increasing its competitiveness. *Tovary i Rynky*, 1, 168–179.
16. Ponomarchuk, V. Ye., & Mormitko, V. H. (2015). Realities of implementation and development of oilseed processing strategy by “VIOIL” industrial group. *Proceedings of Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical Sciences*, 1(2), 117–125. Retrieved from: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpvnutn_2015_1\(2\)_23](http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpvnutn_2015_1(2)_23)
17. Vyshnevskaya, O. D., Vyshnevskiy, D. O., & Onyshchenko, S. P. (2023). Organizational features of cargo delivery using flexitanks. *Transport Development*, 2, 105–118. <https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.09>
18. Verkhovna Rada of Ukraine. (n.d.). *International convention for safe containers*. Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_013#Text
19. International Organization for Standardization. (2025). *ISO 830:2024 Freight containers – Vocabulary*. iTeh Standards. Retrieved from: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/f367fdb6-01ca-416a-9004-66e4e8910394/iso-830-2024>

-
20. Container Owners Association. (2019). *Code of practice – flexitank operators* (Version 6-O, July 2019). Retrieved from: <https://www.containerownersassociation.com/wp-content/uploads/2018/03/COA-Flexitank-Code-of-Practice-V6-O-Operators-07.2019a.pdf>
 21. BSI Standards Limited. (2016). *PAS 1008:2016 Specification for the performance and testing of a single-use flexitank*. British Standards Institution. ISBN 9780580920240.
 22. Verkhovna Rada of Ukraine. (n.d.). *Convention on temporary admission*. Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_472#Text
 23. Supreme Court of Ukraine. (2021, February 16). *Case No. 324/580/17 (2-a/324/25/2017), cassation proceedings No. K/9901/37109/18*. Retrieved from: <https://reyestr.court.gov.ua/Review/95010422>
 24. Supreme Court of Ukraine. (2022, November 11). *Case No. 324/579/17 (2-a/324/24/2017), cassation proceedings No. K/9901/35182/18*. Retrieved from: <https://reyestr.court.gov.ua/Review/107291146>
 25. International Organization for Standardization. (2016). *ISO 21067-1:2016 Packaging – Vocabulary – Part 1: General terms*. iTeh Standards. Retrieved from: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/8b83cad2-aa2c-4ecc-854e-7b676c7d1cc8/iso-21067-1-2016>
 26. European Environment Agency. (n.d.). *Packaging*. Retrieved from: <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/packaging>
 27. Maersk. (n.d.). *Terms for carriage*. Retrieved from: <https://terms.maersk.com/carriage>

Дата першого надходження статті до видання: 11.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.12.2025

Опубліковано: 00.00.2025

МАШИНОБУДУВАННЯ (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЯМИ)

УДК 631.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2026-1-71.24>

Кутковецька Т. О., кандидат економік наук, доцент,
доцент кафедри агроінженерії Уманського національного
університету
ORCID: 0000-0002-4879-2954

ОГЛЯД ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ЗНАРЯДЬ ДЛЯ ПОВЕРХНЕВОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

В статті проведені теоретичні й практичні дослідження щодо існуючих робочих органів знарядь для поверхневого обробітку ґрунту та запропонована їх модернізація, з метою покращення якості обробітку ґрунту і зменшення енерговитрат на виконання технологічних операцій. В результаті виконаних досліджень нами було встановлено, що існують різні конструкції робочих органів машин і знарядь для поверхневого обробітку ґрунту такі, як стрілочасті лапи та диски, що є пасивними робочими органами й мають ряд недоліків, а саме залипання ґрунтом, не повністю підрізання бур'янів тощо. Крім цього вони не зовсім забезпечують агротехнічні вимоги виконання даного виду робіт. Крайні показники роботи мають кільцеві робочі органи з пасивним та активним приводом. За результатами досліджень визначено, що для стабільного виконання поверхневого обробітку ґрунту без залипання ґрунтом робочих органів та кращого знищення бур'янів, їх конструкція має бути у вигляді ротаційних робочих органів з активним приводом. Запропонована модернізація робочих органів, яка полягає в тому, що вони мають мати форму кільцевих робочих органів з поділом суцільного різального полотна на окремі частини та поворот їх під кутом до осі обертання. Дослідженнями встановлено, що пропонувані робочі органи знарядь для поверхневого обробітку ґрунту, в такому вигляді практично не забиваються і не залишають огривів. Перевагою даного технічного рішення є те, що окрім усього зазначеного, за допомогою запропонованої конструкції робочих органів зменшується їх тяговий опір та вони повністю підрізають бур'яни. Визначено, що перспективним напрямком розвитку ґрунтообробної техніки є застосування машин і знарядь, обладнаних ротаційними робочими органами з активним приводом для підвищення якості поверхневого обробітку ґрунту, що відповідає встановленим агротехнічним вимогам.

Ключові слова: робочі органи, знаряддя, поверхневий обробіток ґрунту, технологічні операції, ротаційні робочі органи, активний привід, енергоємність.

Kutkovetska T. O. Inspection and modernization of working bodies tool for surface treatment of soil

The article conducts theoretical and practical research on the existing working bodies of tools for surface tillage and proposes their modernization in order to improve the quality of tillage and reduce energy consumption for performing technological operations. As a result of the research we conducted, we found that there are different designs of working parts of machines and tools for surface tillage, such as arrow-shaped tines and discs, which are passive working parts and have a number of disadvantages, namely, soil sticking, incomplete cutting of weeds, etc. In addition, they do not fully meet the agrotechnical requirements for performing this type of work. The best performance is achieved by annular working bodies with passive and active drives. According to the results of the research, it was determined that for stable performance of surface tillage without soil clogging of the working elements and better destruction of weeds, their design should be in the form of rotary working elements with an active drive. A modernization of the working elements is proposed, which consists in their having the form of ring working elements with the division of the continuous cutting blade into separate parts and their rotation at an angle to the axis of rotation. Research has shown that the proposed working bodies of tools for surface tillage practically do not clog in this form and do not leave any defects. The advantage of this technical solution is that, in addition to all of the above, the proposed design of the working elements reduces their traction resistance and they completely cut the weeds. It has been determined that a promising direction in the development of soil cultivation equipment is the use of machines and tools equipped with rotary working bodies with an active drive to improve the quality of surface tillage, which meets the established agrotechnical requirements.

Key words: working bodies, instrument, surface tillage, technological operations, rotary working bodies, active drive, energy intensity.

Постановка проблеми. Поверхневий обробіток ґрунту – це обробіток на глибину не більше 8 см різними ґрунтообробними агрегатами з метою його розпушування, кришення, знищення бур'янів та вирівнювання поверхні поля [7].



© Т. О. Кутковецька, 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

На сьогодні при вирощуванні сільськогосподарських культур, передпосівний обробіток ґрунту у боротьбі з бур'янами здійснюється найчастіше знаряддями із стрілочастими робочими органами. Відомо, що в умовах підвищеної вологості стрілочасті робочі органи схильні до залипання ґрунтом та обволікання рослинними рештками.

Ґрунтообробні знаряддя, забезпечені дисковими робочими органами працездатні на більш вологих, засмічених ґрунтах, при цьому не забиваються при роботі на полях з високою стернею. Але, застосування знарядь з такими робочими органами не забезпечують необхідну якість при виконанні технологічних операцій.

Модернізація кільцевих робочих органів шляхом поділу суцільного різального полотна на окремі частини та поворот їх під кутом до осі обертання, забезпечує умови для стабільного виконання поверхневого обробітку ґрунту без їх залипання. У зв'язку із наведеною вище проблемою тема дослідження є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженнями щодо конструкцій робочих органів знарядь для поверхневого обробітку ґрунту займалися різні науковці: Ю. І. Гаїна [2, с. 56], С. М. Грушецький [2, с. 51], І. М. Мушеник [2, с. 53], Ю. М. Білик [4, с. 82], В. О. Герасименко [4, с. 85], С. М. Замойський [4, с. 85], М. В. Лук'янюк [4, с. 84], М. А. Жмуренко [12, с. 90], Г. В. Фесенко [12, с. 93] та ін. Однак, на сьогодні, ще існують невирішені проблеми відносно їх будови та забезпечення підвищення якості обробітку ґрунту в різних умовах.

Мета статті. Метою статті є виконання дослідження відносно огляду та модернізації робочих органів знарядь для поверхневого обробітку ґрунту з ціллю забезпечення підвищення якості виконання технологічних операцій та зменшення енергоємності знарядь.

Виклад основного матеріалу. При вирощуванні сільськогосподарських культур для виконання технологічних операцій поверхневого обробітку ґрунту застосовуються машини й знаряддя, які обладнані пасивними робочими органами, що здійснюють прямолінійно поступальний рух та ротаційні робочі органи, які виконують одночасно поступальний та обертальний рух. Класифікація робочих органів для поверхневого обробітку ґрунту наведена на рис. 1 [3].

Як зазначалося вище, передпосівний обробіток ґрунту для боротьби із бур'янами здійснюється в більшій мірі знаряддями, обладнаними стрілочастими робочими органами. Але, враховуючи розташування коренів бур'янів у ґрунті, необхідна глибина обробітку має бути на 3–5 см, в той час, як знаряддя із стрілочастими робочими органами працюють на глибину 8–10 см [13, с. 45; 1, с. 226]. До того ж стрілочасті робочі органи підрізають бур'яни лише зверху, залишаючи коріння в шарі ґрунту, при цьому приживання бур'янів становить близько 10–12 %. Через зазначений недолік стрілочасті робочі органи не забезпечують належного якісного обробітку ґрунту і не здатні знищити коріння бур'янів на невеликій глибині.

В умовах підвищеної вологості ґрунту, стрілочасті робочі органи схильні до залипання ґрунтом, а також обволікання рослинними рештками, і таким чином зростання тягового опору. Внаслідок цього трактори працюють з великим буксуванням, так як ґрунт, у весняний період знаходиться у вологому стані та має погані зчіпні властивості.

Однак, стрілочасті робочі органи добре справляються із завданням відносно створення вирівняного та ущільненого дна борозни. Їх леза лежать в одній площині, а поступальний рух забезпечує отримання рівного дна борозни. Поряд з цим, в перспективі залишаються питання, пов'язані з підвищенням якості існуючих агротехнічних вимог щодо виконання робіт ґрунтообробними знаряддями.

Знаряддя, які обладнані дисковими робочими органами, зокрема лушильники, мають ряд переваг по відношенню до знарядь із стрілочастими робочими органами. Вони інтенсивніше впливають на верхній шар ґрунту, що забезпечують повне знищення бур'янів. Проте, основним недоліком лушильника вважається обертання ґрунту, що призводить до випаровування ґрунтової вологи (висушування ґрунту), при цьому він закладає до 50–60 % стерні всього за один прохід агрегату [11, с. 35].

Агрегати, які обладнані кільцевими робочими органами мають переваги в порівнянні з вище зазначеними знаряддями. Основною перевагою кільцевих робочих органів є здатність виривати та укладати бур'яни на поверхню поля, тим самим, виключаючи їх приживання, що принципово відрізняється від процесу роботи

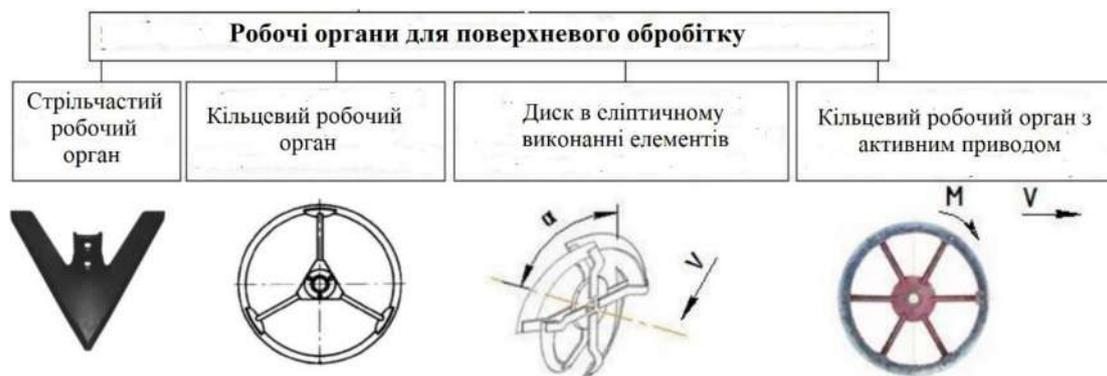


Рис. 1. Класифікація робочих органів для поверхневого обробітку ґрунту

стрілчастих та дискових робочих органів, які лише здатні перерізати їх [14, 15]. Тому, особливістю подібних робочих органів вважається той факт, що вони практично не забиваються і не залишають огріхів, крім усього зазначеного мають низький питомий опір та практично повністю підрізають бур'яни [7, 10].

Поряд із перевагами вказаних робочих органів варто зазначити й недоліки, це те, що на робочій поверхні кільцевих робочих органів з пасивним приводом відсутнє ковзання ґрунту, що призводить до формування ґрунтових утворень і таким чином, погіршення якості обробітку ґрунту та підвищення тягового опору. Кращі показники роботи мають кільцеві робочі органи з активним приводом. Дослідженнями формування ґрунту на поверхні ротаційних робочих органів займалися різні науковці [4, с. 82; 8].

Отже, з метою підвищення якості передпосівного обробітку ґрунту нами запропоновано знаряддя з активним приводом ротаційних робочих органів для поверхневого обробітку ґрунту (Рис. 2).

Пропоноване знаряддя здатне знищувати до 97 % бур'янів й забезпечувати кришення ґрунту в межах 81 %. Після проходу знаряддя гребеністість поверхні поля не перевищує 2,5–3 см, при цьому зберігається на поверхні поля 70 % рослинних решток. Активний привід кільцевих робочих органів покращує якість передпосівного обробітку ґрунту [3].

Розроблений ротаційний робочий орган з активним приводом складається з маточини 1, до якої кріпляться спиці 2 з різальними ножами 3 (рис. 3) [6, с. 243].

Робочий орган обертається навколо осі $l-l$, відхиленої від поперечної площини на кут атаки β з кутовою швидкістю ω . Різальні ножі, що мають форму частини еліпса, для забезпечення постійної глибини обробітку ґрунту, відхилені від осі обертання $l-l$ на кут α [5, с. 60]. Різальні краї ножів збігаються з поверхнею циліндра з діаметром, рівним діаметру кільцевого робочого органу. Таке виконання робить більш досконалим взаємодію робочого органу з ґрунтом, з точки зору забезпечення ковзання ґрунту по поверхнях різальних ножів, щоб уникнути



Рис. 2. Агрегат з активним приводом кільцевих робочих органів

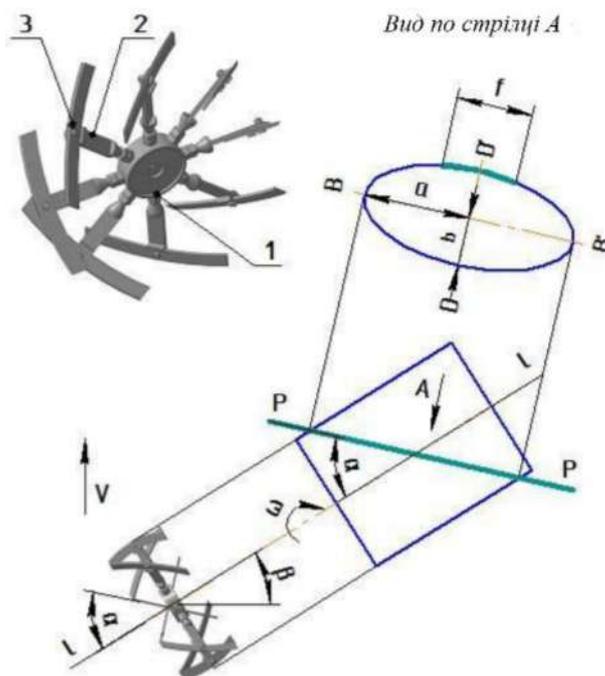


Рис. 3. Ротаційний робочий орган, різальні ножі якого виконані по еліптичній лінії

погіршення якості обробітку ґрунту. Встановлення різальних ножів на кут α дозволяє уникнути формування ґрунтової просвіту на їх поверхні. Вектор V характеризує поступальну швидкість руху робочого органу [3].

Технологічна операція обробітку ґрунту ротаційним робочим органом здійснюється наступним чином. Робочі органи збираються в батарею, встановлюються в один ряд під кутом атаки β і приводяться в дію від ВВП трактора. Заглиблюючись у ґрунт на задану глибину робочий орган, здійснює його розпушування, паралельно підрізаючи бур'яни й виносячи їх на поверхню поля, та вирівнювання поверхні поля [6, с. 244].

Дослідженнями науковців встановлено, що застосування таких робочих органів на операціях поверхневого обробітку ґрунту дозволяє знизити витрати потужності на 14–16 % порівняно з іншими наведеними робочими органами. Питомі витрати потужності на виконання технологічної операції поверхневого обробітку ґрунту мінімальні при кінематичному параметрі $h = 1,14 \dots 1,21$ і куті атаки 40° [5, с. 76]. Довжина батареї ротаційних робочих органів має бути не менше 1,6 м. За наведених параметрів конструкції робочих органів пропонованого знаряддя підвищується якість обробітку ґрунту, що відповідає встановленим агротехнічним вимогам щодо виконання даної технологічної операції [3].

Висновки. Отже, в результаті виконаних досліджень ми здійснили огляд конструкцій робочих органів знарядь для поверхневого обробітку ґрунту та визначено їх переваги й недоліки на основі чого нами запропоновано конструкцію знаряддя з активним приводом ротаційних робочих органів для вказаного виду робіт. При цьому визначено, що застосування кільцевих робочих органів шляхом поділу суцільного різального полотна на окремі частини та поворот їх під кутом до осі обертання, забезпечує умови для стабільного виконання поверхневого обробітку ґрунту без їх залипання. Крім того, запропонована установка дозволить покращити якісні показники технологічної операції та виконання агротехнічних вимог.

Таким чином, нами визначено, що нині перспективним напрямком розвитку ґрунтообробної техніки для підвищення якості поверхневого обробітку ґрунту є застосування знарядь, обладнаних ротаційними робочими органами з активним приводом.

Список використаних джерел:

1. Алфьоров О. І., Гринченко О. С., Савченко В. Б., Юр'єва Г. П. Теоретичний аналіз автоколивачів ґрунтообробних органів на пружній підвісці з урахуванням стохастичних факторів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*, 2016. (5), 225–231.
2. Грушецький С. М., Мушеник І. М., Гаїна Ю. І. Аналіз та перспективи технологічних і конструктивних особливостей ротаційних робочих органів для поверхневого обробітку ґрунту. *Інженерія природокористування*, 2021. 4(22), 50–58. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6967468>
3. Гулеватий О. А. *Удосконалення агрегату для поверхневого обробітку ґрунту з активним приводом ротаційних робочих органів та обґрунтування параметрів його роботи* (дипломний проект). Уманський національний університет. Умань, Україна. 2025.
4. Замойський С. М., Білик Ю. М., Курской В. С., Лук'янюк М. В., Герасименко В. О. Ступінь подрібнення ґрунту ротаційним розпушувачем. *Інженерія природокористування*, 2022. 1(23), 81–86. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6819484>
5. Кобець А. С., Волик Б. А., Пугач А. М. *ґрунтообробні машини: теорія, конструкція, розрахунок*. Дніпропетровськ : Свідлер А. Л. 2015.
6. Кутковецька Т. О., Шевчук М. В. Удосконалення конструкції ротаційного робочого органу для передпосівного обробітку ґрунту. *The XVIII International scientific and practical conference «Topics of research in scientific and educational activities»*. (pp. 243–245). May 05-07, 2025, Zaragoza, Spain.
7. Мойсеєнко В. Дудака С. Огляд комбінованих ґрунтообробних агрегатів. *Пропозиція*, (8). 2017. URL: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnika-ta-obladnannya-tekhnika-dlya-obrobitku-gruntu/ohlyad-kombinovanykh>
8. Погорілий В., Шустік Л., Громадська В., Нілова Н., Степченко С., Царану С. Поверхневий обробіток ґрунту: одна машина – різні машини. *Пропозиція*, (10). 2019. URL: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnika-ta-obladnannya-tekhnika-dlya-obrobitku-gruntu/poverkhnevyy-obrobitok-gruntu-odna>
9. Поляков А. М., Фесенко Г. В., Брюховецький В. В. Аналіз і обґрунтування технічних засобів поверхневого обробітку ґрунту з підвищеною грудкуватістю. *Інженерія природокористування*, 2019. 4(14). 41–46. [https://doi.org/10.37700/enm.2019.4\(14\).41-46](https://doi.org/10.37700/enm.2019.4(14).41-46)
10. Ротаційні борони у сучасному землеробстві. (2025). URL: <https://agroexpert.ua/rotatsijni-borony-u-suchasnomu-zemlerobstvi/>
11. Теслюк Г. В., Волик Б. А., Сокол С. П., Кобець О. М., Сенменюта А. М. *ґрунтообробні агрегати на основі дискових робочих органів*. Дніпропетровськ: ТОВ «Акцент ПП». 2016.
12. Фесенко Г. В., Жмуренко М. А. Аналіз технологічних властивостей робочих органів культиватора передпосівного поверхневого обробітку ґрунту і удосконалення стрілкової лапи. *Інженерія природокористування*, 2020. 1(15). 89–94. [https://doi.org/10.37700/enm.2020.1\(15\).89-94](https://doi.org/10.37700/enm.2020.1(15).89-94)
13. Шустік, Л. (2015). Техніка для передпосівного обробітку ґрунту. *Пропозиція*, (1). URL: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnika-ta-obladnannya/tekhnika-dlya-pe-red-posivno-ho-ob-ro-bit-ku-hrun-tu>

14. Alwan A. A. Field Study of Soil Pulverization Energy by using Different Moldboards Types Under Various Operating Condition. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 2019. 32(2). 373–388. <https://doi.org/10.37077/25200860.2019.284>

15. Liu J., Kushwaha R. L. Modeling of Soil Profile Produced by a Single Sweep Tool. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript PM 06 008. (Vol. VIII). 1–13.

References:

1. Alforov, O. I., Hrynchenko, O. S., Savchenko, V. B. & Yurieva H. P. (2016). Teoretychnyi analiz avtokolyvan hruntoobrobnykh orhaniv na pruzhnii pidvisti z urakhuvanniam stokhastychnykh faktoriv [Theoretical analysis of self-oscillations of soil tillage tools on an elastic suspension taking into account stochastic factors]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*, (5), 225–231.

2. Hrushetskyi, S. M., Mushenyk, I. M. & Haina, Yu. I. (2021). Analiz ta perspektyvy tekhnolohichnykh i konstruktivnykh osoblyvosti rotatsiinykh robochykh orhaniv dlia poverkhnevoho obrobittu gruntu [Analysis and prospects of technological and design features of rotary working tools for surface tillage]. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*, 4(22), 50–58. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6967468>

3. Hulevatiy, O. A. (2025) Udoskonalennia ahrehatu dlia poverkhnevoho obrobittu hruntu z aktyvnym pryvodom rotatsiinykh robochykh orhaniv ta obhruntuvannia parametriv yoho roboty (dyplomnyi proekt) [Improvement of the unit for surface tillage with active drive of rotary working bodies and justification of its operating parameters (diploma project)]. Umanskyi natsionalnyi universytet. Uman, Ukraina.

4. Zamoiskyi, S. M., Bilyk, Yu. M., Kurskoi, V. S., Lukianiuk M. V. & Herasymenko, V. O. (2022). Stupin podribnennia gruntu rotatsiynym rozpushuvachem [Degree of soil grinding by a rotary tiller]. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*, 1(23), 81–86. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6819484>

5. Kobets, A. S., Volyk, B. A. & Puhach, A. M. (2015). Gruntoobrobni mashyny: teoriia, konstruktsiia, rozrakhunok [Soil tillage machines: theory, design, calculation]. Dnipropetrovsk: Svidler A. L.

6. Kutkovetska, T. O. & Shevchuk, M. V. Udoskonalennia konstruktsii rotatsiinoho robochoho orhanu dlia peredposivnoho obrobittu hruntu [Improving the design of the rotary working body for pre-sowing soil cultivation]. The XVIII International scientific and practical conference “Topics of research in scientific and educational activities”. (rr. 243–245). May 05-07, 2025, Zaragoza, Spain.

7. Moiseienko, V. & Dudaka, S. (2017). Ohliad kombinovanykh hruntoobrobnykh ahrehativ [Review of combined soil cultivation units]. Propozytsiia, (8). Retrieved from: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnika-ta-obladnannya-tekhnika-dlya-obrobittu-gruntu/ohlyad-kombinovanykh>

8. Pohorilyi, V., Shustik, L., Hromadska, V., Nilova, N., Stepchenko, S. & Tsaranu, S. (2019). Poverkhnevyy obrobittok hruntu: odna mashyna – rizni mashyny [Surface soil cultivation: one machine – different machines]. Propozytsiia, (10). Retrieved from: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnika-ta-obladnannya-tekhnika-dlya-obrobittu-gruntu/poverkhnevyy-obrobittok-gruntu-odna>

9. Poliakov, A. M., Fesenko, H. V. & Briukhovetskyi, V. V. (2019). Analiz i obgruntuvannia tekhnichnykh zasobiv poverkhnevoho obrobittu hruntu z pidvyshchenoiu hrudkuvatistiu [Analysis and justification of technical means of surface soil cultivation with increased lumpiness]. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*, 4(14). 41–46. [https://doi.org/10.37700/enm.2019.4\(14\).41-46](https://doi.org/10.37700/enm.2019.4(14).41-46)

10. Rotatsiini borony u suchasnomu zemlerobstvi [Ротаційні борони у сучасному землеробстві]. (2025). Vylucheno iz <https://agroexpert.ua/rotatsijni-borony-u-suchasnomu-zemlerobstvi/>

11. Tesliuk, H. V., Volyk, B. A., Sokol, S. P., Kobets, O. M. & Senmeniuta, A. M. (2016). Hruntoobrobni ahrehaty na osnovi dyskovykh robochykh orhaniv [Soil tillage units based on disk working bodies]. Dnipropetrovsk : TOV “Aktsent PP”.

12. Fesenko, H. V. & Zhmurenko, M. A. (2020). Analiz tekhnolohichnykh vlastyvosti robochykh orhaniv kultyvatora peredposivnoho poverkhnevoho obrobittu gruntu i udoskonalennia strilchastoi lapy [Analysis of technological properties of working bodies of a cultivator for pre-sowing surface tillage and improvement of a lancet paw]. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*, 1(15). 89–94. [https://doi.org/10.37700/enm.2020.1\(15\).89-94](https://doi.org/10.37700/enm.2020.1(15).89-94)

13. Shustik, L. (2015). Tekhnika dlia peredposivnoho obrobittu hruntu [Equipment for pre-sowing tillage]. Propozytsiia, (1). Retrieved from: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnika-ta-obladnannya/tekhnika-dlya-pe-red-posivno-ho-ob-ro-bit-ku-hrun-tu>

14. Alwan, A. A. (2019). Field Study of Soil Pulverization Energy by using Different Moldboards Types Under Various Operating Condition. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 32(2). 373–388. <https://doi.org/10.37077/25200860.2019.284>

15. Liu, J. & Kushwaha, R. L. Modeling of Soil Profile Produced by a Single Sweep Tool. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript PM 06 008. (Vol. VIII). 1–13.

Дата першого надходження статті до видання: 18.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННА СПРАВА ТА КЕЙТЕРИНГ

УДК 338.48:379.8:656:658.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2026-1-71.25>

Горб К. М., кандидат географічних наук, доцент
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-3779-484X

Корнєєв М. В., доктор економічних наук, професор
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-4005-5335

Небаба Н. О., доктор економічних наук, професор
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
ORCID: 0000-0003-1264-106X

Сайгак Є. Л., доктор філософії Університету митної справи
та фінансів
ORCID: 0000-0002-6406-9272

ГОТЕЛЬНИЙ СЕРВІС НА ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ В ТУРИСТИЧНОМУ ОБСЛУГОВУВАННІ: ЗАГАЛЬНІ ЗАСАДИ ТА НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Стаття присвячена систематизації інформації щодо застосування основних принципів та процедур готельного обслуговування на транспортних засобах, здебільшого під час їх руху в межах туристичної подорожі, з метою насамперед подальшого вдосконалення системи стандартизації та сертифікації послуг перевезення і розміщення туристів та їх комбінацій. Організація ночівель на транспортних засобах протягом їх руху в багатьох випадках потребує застосування принципів, методів та технологій готельного господарства та готельного сервісу. Авторами виділено різні напрями поєднання та зв'язку готельних і транспортних послуг у процесі обслуговування туристів під час подорожей – готелі при хабах, спільність процедур бронювання, транспортний сервіс класичних готельних підприємств, стаціонарні готелі у колишніх рухомих транспортних засобах, та наявність готельного сервісу різного рівня прояву і специфіки на транспортних засобах під час тривалих та далеких перевезень туристів. Останній напрям зумовлює диференціацію глибини застосування готельних технологій на рухомих транспортних засобах залежно від тривалості подорожі, їх конструкції та технічних характеристик.

Вказані обставини дозволили авторам виділити п'ять рівнів готельного забезпечення тривалого туристичного транспортного руху – від надання мінімального сервісу щодо покращення комфорту та зручності ночівель на місцях для сидіння в умовах обмеженого простору салону (класичні туристичні автобуси) до повноцінного диверсифікованого сервісно-виробничого рухомого готельного комплексу з найширшим спектром основних, додаткових та супутніх послуг (великі багатопалубні круїзні лайнери). На останньому рівні особливо яскраво та повноцінно використовуються усі організаційно-управлінські та техніко-технологічні складові, правила та принципи класичного готельного господарства, включно з білизняним, ліфтовим, клінінговим та іншими типовими готельними службами й сервісами.

Використання даної п'ятирівневої моделі дасть змогу в подальших розробках включити транспортні засоби, під час руху яких при забезпеченні туристичних подорожей найбільш яскраво проявляється готельний сервіс, до важливих складових частин в системі організації готельного господарства, врахувати їх у формуванні національних та інших стандартів готельного обслуговування, що має велике значення для підвищення якості послуг та конкурентоздатності підприємств туристичного, транспортного та готельного бізнесу.

Ключові слова: готельний сервіс на рухомих транспортних засобах, комбінування готельних та транспортних послуг, рівень готельного забезпечення тривалого туристичного транспортного руху, готельне господарство, круїзний сервіс.



© К. М. Горб, М. В. Корнєєв, Н. О. Небаба, Є. Л. Сайгак, 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Horb K. M., Korneyev M. V., Nebaba N. O., Saihak Ye. L. Hotel service on vehicles in tourist services: general principles and directions of research

The article is devoted to systematizing information on the application of the basic principles and procedures of hotel service on vehicles, mainly during their movement within the framework of a tourist trip, with the aim, first of all, of further improving the system of standardization and certification of tourist transportation and accommodation services and their combinations. The organization of overnight stays on vehicles during their movement in many cases requires the application of the principles, methods and technologies of the hotel industry and hotel service.

The authors have identified various areas of combination and connection of hotel and transport services in the process of servicing tourists during travel – hotels at hubs, common booking procedures, transport service of classic hotel enterprises, stationary hotels in former mobile vehicles, and the presence of hotel service of various levels of manifestation and specificity on vehicles during long and long-distance transportation of tourists. The latter area determines the differentiation of the depth of application of hotel technologies on mobile vehicles depending on the duration of the trip, their design and technical characteristics. The above circumstances allowed the authors to identify five levels of hotel support for long-distance tourist transport – from providing minimal service to improve the comfort and convenience of overnight stays in seats in conditions of limited interior space (classic tourist buses) to a full-fledged diversified service-production mobile hotel complex with the widest range of basic, additional and related services (large multi-deck cruise liners). At the last level, all organizational, managerial, technical and technological components, rules and principles of classic hotel management are used particularly vividly and fully, including laundry, elevator, cleaning and other typical hotel services.

The use of this five-level model will allow in further developments to include vehicles, during the movement of which hotel service is most clearly manifested when providing tourist travel, to important components in the system of hotel organization, to take them into account in the formation of national and other standards of hotel service, which is of great importance for improving the quality of services and competitiveness of enterprises in the tourism, transport and hotel business.

Key words: hotel service on mobile vehicles, combination of hotel and transport services, level of hotel support for long-term tourist transport, hotel management, cruise service.

Постановка проблеми. Проблема комплексного обслуговування туристів та інших подорожуючих осіб як під час пересування траєкторією маршруту, так і протягом їх перебування в місцях відпочинку, в сучасних умовах є достатньо важливою, насамперед в силу поступового прискорення впровадження у практику туристичного сервісу останніх досягнень науково-технічного прогресу та інших інновацій (організаційних, управлінських, маркетингових тощо). Транспортні та готельні послуги в туристичному процесі, особливо протягом тривалих турів, зазвичай є ключовими сервісними блоками, від якості яких значною мірою залежить ефективність реалізації туристичного продукту (включно із задоволеністю туристів), а відтак і комерційний та іміджевий успіх їх надавачів.

Якісний сервіс і протягом пересування за маршрутом, і протягом стаціонарного перебування туристів у межах туристичних дестинацій, є важливою запорукою продуктивного відновлення сил споживачів. При цьому є очевидним, що забезпечення якісних ночівель та надання супутніх послуг (сніданок, окремі оздоровчі процедури та розважальні заходи тощо) під час багатоденних туристичних подорожей часто відбувається і в стаціонарному, і в рухомому форматі. Організація ночівель на транспортних засобах протягом їх руху в багатьох випадках потребує застосування принципів, методів та технологій готельного господарства та готельного сервісу. Але будь-яка аналітика щодо порівняльної оцінки та співставлень таких підходів для стаціонарних і рухомих засобів розміщення туристів як у науковій та навчальній літературі, так і в інструктивно-методичних матеріалах практично відсутня. У зв'язку з вищевикладеним означену проблему можна вважати актуальною та своєчасною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У різних наукових, навчальних та інструктивно-методичних джерелах проблематика туристичного сервісу на транспорті та в готелях зазвичай розглядається окремо, з урахуванням змістовно та технологічно різних прийомів забезпечення основних їх функцій – перевезення та розміщення. Головним чином обидва із зазначених сервісних туристичних блоків представлені у працях та матеріалах, присвячених організації туризму та туристичного обслуговування загалом, поряд з екскурсійним, розважальним, оздоровчим, «конференційним» та іншими блоками ([14, 35] та ін.). При цьому будь-які спроби більш-менш глибоко обґрунтувати сервіс щодо ночівлі туристів на транспортних засобах протягом їх руху, тим більше – із застосуванням готельних технологій, навіть у таких комплексних роботах практично відсутні. Також важливим підґрунтям для подальшого аналізу в рамках зазначеної проблематики варто назвати роботи з організації готельного обслуговування, у т. ч. і його транспортної складової ([5, 7, 13, 23, 27, 30, 34 та ін.); з організації транспортного обслуговування туристів ([11, 32, 36, 38] тощо), у т. ч. з круїзного сервісу ([10, 20, 24, 31] та ін.). Окремим суттєвим елементом джерельної бази досліджень зазначеного напрямку можуть виступати й різні популярні офіційні публікації здебільшого новинного характеру, що підкреслюють використання принципів готельного обслуговування на транспорті (наприклад, [3, 4, 21, 39] тощо).

Метою статті є систематизація відомостей щодо застосування основних принципів та процедур готельного обслуговування на транспортних засобах, здебільшого під час їх руху в межах туристичної подорожі, з метою насамперед подальшого вдосконалення системи стандартизації та сертифікації послуг перевезення і розміщення туристів та їх комбінацій.

Виклад основного матеріалу. Взаємодію надання та комбінування послуг перевезення і розміщення туристів та інших подорожуючих осіб в сучасних умовах можна простежити на такими напрямками.

По-перше, специфіка процедур бронювання послуг і транспортних перевезень, і проживання у засобах розміщення має багато спільних рис, вони здійснюються за схожими схемами, у якості посередників обох видів бронювання й замовлення відповідних квитків та місць і номерів (кімнат, апартаментів, кают, купе тощо) зазвичай виступають одні й ті самі організації, здебільшого туристичного профілю (туроператори та туристичні агентства) ([25] та ін.).

По-друге, при великих транспортних хабах (міжнародних аеропортах та морських портах, залізничних та автобусних вокзалах) зазвичай наявні послуги розміщення пасажирів – від декількох готельних номерів до повноцінних готелів, як одна зі складових частин сервісного комплексу хабу ([16] та ін.).

По-третє, в системі сервісу багатьох стаціонарних готельних закладів наявна транспортна складова, що полягає у наданні готелем в основному послуг трансферних засобів перевезення (до вокзалу, до пляжу, до центру міста тощо), а також стоянок та частково технічного обслуговування транспортних засобів постояльців готелю ([7, 34] та ін.). Остання послуга є основною для спеціалізованих засобів розміщення, орієнтованих на обслуговування транзитних подорожуючих осіб, – мотелів, автокемпінгів тощо.

По-четверте, у якості спеціалізованих (почасти екзотичних) закладів розміщення туристів та інших подорожуючих осіб поступово поширюються перепрофільовані, реконструйовані та трансформовані у готелі колишні транспортні засоби, рухомі у минулому, а після зазначеної трансформації – стаціонарно «закріплені» в конкретних, зазвичай привабливих для туристів місцях. Сюди можна віднести такі специфічні засоби, як ротелі, ботелі, флайтелі тощо. Окремі з них можуть періодично (як правило, у сприятливий сезон року) рухатись, але в основному на невеликій відстані з прогулянковою метою ([18, 22] тощо).

По-п'яте, під час тривалих туристичних та інших перевезень на багатьох транспортних засобах надаються послуги класичного готельного сервісу, насамперед надання ліжко-місць для повноцінної комфортної ночівлі протягом тривалого переїзду, а також багатьох додаткових і супутніх послуг виключно готельного генезису, доволі різноманітних залежно від виду транспорту та модифікації і призначення самого транспортного засобу, – харчування, розваги, оздоровлення тощо.

Останній із наведених напрямів сполучення готельних і транспортних послуг у туристичному процесі, на наш погляд, є особливо актуальним в сучасних умовах впровадження численних інновацій і в готельному, і в транспортному секторах туризму, зважаючи на фактичну відсутність в літературі будь-якого співставлення та аналізу застосування основ готельного господарства у стаціонарних «нерухомих» готелях та на пасажирських транспортних засобах під час тривалих переїздів. Тому вважаємо за доцільне детальніше зупинитись на комбінації двох зазначених спеціалізованих блоків туристичних послуг протягом руху на значні відстані.

Залежно від особливостей конструкції та технічних характеристик одиниць рухомого складу чотирьох класичних видів пасажирського транспорту, що надає послуги далеких і тривалих перевезень (автомобільного й автобусного, авіаційного, залізничного та водного), можна спостерігати різну міру та специфіку застосування елементів готельного сервісу та відповідних зручностей протягом перевезення, починаючи з компактних відкидних сидінь з локальним освітленням та вентиляванням із наданням пледів та подушок, до повноцінного «багатошарового» та диверсифікованого готельного виробничо-сервісного комплексу на транспортному засобі під час його руху, включно з білизняним та ліфтовим господарством. У зв'язку з цим ми здійснили спробу систематизації таких ступенів упровадження готельних технологій на рухомому пасажирському транспорті, в результаті чого було виділено п'ять рівнів готельного сервісного забезпечення транспортного туристичного руху далекого та тривалого спрямування, що в узагальненому вигляді відображено у (табл. 1).

Аналізуючи авторську розробку щодо багаторівневості готельного сервісного забезпечення перевезень туристів на різних транспортних засобах, відображеної в табл. 1, варто першочергово зазначити, що в самій таблиці ми зацентрували увагу виключно на основних послугах готельного змісту, представлених на відповідному рівні. Але при цьому на кожному з рівнів на відповідних місцях та у приміщеннях для ночівлі на транспортному засобі під час його руху наявні і додаткові послуги, супроводжувані характерними зручностями, наприклад, виклик провідника (бортпровідника), замовлення їжі та напоїв у форматі Room Service (навіть у салонах з відкритим простором та сидячими місцями) тощо.

Загалом очевидно, що у пропонованій моделі з кожним наступним рівнем готельний сервіс розширюється, урізноманітнюється та ускладнюється. Сама наявність готельних послуг при перевезеннях туристів на транспортних засобах починається із забезпечення комфортного відпочинку вночі під час руху навіть на сидячих місцях з різко обмеженими можливостями пасажирів рухатися всередині салону, де технічне забезпечення зручностей (відкидні сидіння та столики, локальні лампи, вентилявання тощо) може доповнюватись наданням пледу, подушки, кави, легких закусок та ін.

Другий рівень починається із забезпечення ночівель на лежачих місцях у відкритому салоні рухомого засобу будь-якого виду транспорту (формату «хостел»), в деяких випадках особистий простір кожного пасажиря на таких місцях може «підкріплюватись» занавісками (у т. ч. й жалюзі-формату) і із зовнішнього

Рівні готельного забезпечення тривалого туристичного транспортного руху

Рівень	Специфіка основних послуг готельного генезису	Приклади транспортних засобів та послуг протягом подорожей
Перший	Забезпечення комфортної ночівлі на сидячих місцях (як у форматі купе, так і відкритого салонного простору)	Сервіс тривалих нічних автобусних переїздів в турах; салони із сидіннями підвищеного комфорту на водних, залізничних та повітряних транспортних засобах
Другий	Надання лежачих місць для ночівлі у форматі «хостелу» (відкритого простору салону)	Плацкартні вагони, автобуси-«трансформери», відкриті салони авіаційних та водних транспортних засобів із ліжками
Третій	Місця для ночівлі в закритих приміщеннях «номерного» формату (купе, каюти)	Купейні вагони; автобуси, літаки та плавзасоби із закритими купе і каютами з ліжко-місцями
Четвертий	Наявність додаткових приміщень і просторів для відпочинку та розваг, поряд з можливостями ночівлі різного формату зручностей високого рівня комфорту	Комфортні ночівлі з можливістю відвідування під час руху: вагонів-ресторанів, кафе, барів, гральних кімнат, Scenic Rooms із прозорими стінами та стелями тощо – у потягах, автобусах, літаках, на катерах та кораблях; караванінг
П'ятий	Повноцінне готельне господарство на рухомому транспортному засобі: номери (каюти) із сервісом клінінгу та хаускіпінгу, послуги харчування, розваг, оздоровлення під час руху; наявність ресторанного, білизняного, ліфтового господарства	Комплексний тривалий відпочинок протягом руху на великогабаритних багатопалубних круїзних лайнерах

Джерело: складено авторами

(вікно), і з внутрішнього боку салону. У цьому випадку вже маємо справу з видачею пасажирам постільної спальної білизни, комплекти якої мають бути заздалегідь підготовлені у відповідності до вимог якості та функціональності.

«Транспортно-готельний» сервіс третього рівня починається з обслуговування, що передбачає розміщення пасажирів у приміщеннях з більш високим забезпеченням використання особистого простору насамперед під час ночівель, що являють собою аналог готельних номерів, – купе та каюти. Надання постільної білизни тут доповнюється забезпеченням дизайну та ергономічності внутрішнього простору – столова білизна, окремі елементи декору тощо, в окремих випадках – санвузли у кожному купе, на додаток до стандартних зручностей.

На четвертому рівні запровадження готельного сервісу під час перевезень туристів та пасажирів на транспортних засобах, крім зручних ночівель у купе та каютах, додаються можливості відпочинку та харчування в інших загальних приміщеннях транспортного засобу (у потязі – рухомого складу): кафе, бари, ресторани, ігрові кімнати, салони для милування мальовничими краєвидами в русі, тощо. Особливо такий сервіс характерний для туристичних потягів високого рівня комфорту ([3], [6] та ін.). У цьому випадку транспортний засіб уже розглядається не лише як спосіб для зручної та комфортної подорожі вдень і вночі, а і як пересувний багатокомпонентний сервісний комплекс із можливостями різностороннього відпочинку та розваг, як джерело насолоди та позитивних туристичних вражень. Специфічним напрямом прояву сервісу та зручностей даного рівня можна вважати і караванінг – використання у подорожах автотранспортних засобів або причепів до них із повним комплексом життєзабезпечення [37]. Загалом починаючи з четвертого рівня готельного сервісу транспортні засоби вже отримують ярлики-епітети «рухомий готель на колесах», «літаючий готель», «плавучий готель».

Нарешті, найвищий, п'ятий рівень забезпечення транспортного готельного сервісу протягом руху під час туристичних та інших подорожей являє собою найбільш складну та розгалужену систему готельних послуг на великогабаритних пересувних пасажирських туристичних засобах транспорту. Головним критерієм тут виступає багатоповерховість (багатопалубність) такого засобу, починаючи зазвичай від трьох палуб і вище, з урахуванням, що двоповерхові автобуси, літаки, вагони та катери могли бути представлені на попередніх рівнях. До таких «лайнєрів-готелів» варто віднести насамперед великі круїзні судна (в окремих випадках – і поромі), які характеризуються багатьма експертами вже не як «плавучі готелі», а як «плавучі курорти». Деякі з них за рівнем та різноманітністю сервісу, привабливістю дизайну та вишуканістю внутрішнього простору вже перевищують найрозкішніші стаціонарні готелі ([26], [28] та ін.). На даному рівні особливо яскраво та повноцінно використовуються усі організаційно-управлінські та техніко-технологічні складові, правила та принципи класичного готельного господарства, включно з білизняним, ліфтовим, клінінговим та іншими типовими готельними службами й сервісами.

В цілому запропонована та представлена п'ятирівнева модель готельного сервісу на пасажирських транспортних засобах під час їх руху в процесі туристичних та інших подорожей може бути покладена в основу подальших розробок щодо співставлення та порівняння готельних, туристичних та транспортних сервісних технологій, відповідно і туристичного та готельного менеджменту, опрацювання та обґрунтування стандартів готельного обслуговування у процесі туристичних та інших пасажирських перевезень тощо. У цьому ключі важливим є і порівняльний аналіз систем категоризації «нерухомих» готелів та туристичних транспортних засобів «із готельними послугами на борту» та їх номерів (кают, купе) (систем зірок, балів, ключів, корон та ін.). Наприклад, зовні ніби однакові для стаціонарного та рухомого форматів сервіси забезпечуються принципово різними процедурами формування запасів продуктів харчування, джерел безперебійного постачання води, опалення та електроенергії, тощо. Для рухомих засобів розміщення логістика такого постачання значно складніша, аніж для стаціонарних, оскільки ґрунтується не лише на потребах у періодичному їх поновленні з усталених джерел, а і враховує час переміщення транспортного засобу до кожного наступного пункту такого постачання та його специфіку (країна та регіон розташування, ціна та якість продукту і т. ін.) протягом маршруту.

З урахуванням зазначених та інших факторів забезпечення якості і характеру послуг розміщення та інших компонентів готельного сервісу саме на транспортних засобах під час їх руху в процесі туристичних та інших подорожей варто у подальшому визначити спільні та відмінні риси щодо вимог до основних параметрів ключових таких послуг для рухомих і стаціонарних засобів розміщення туристів. Можна порекомендувати авторам наступних навчальних та навчально-методичних матеріалів і видань (підручників, посібників, методичних вказівок тощо) з організації готельного господарства, а внаслідок – і розробникам інструктивно-методичних матеріалів і відповідних державних та інших стандартів стосовно якості готельного сервісу, обов'язково або включити спеціальні розділи щодо рухомих засобів розміщення, або окремо детально розглядати особливості прояву кожної ланки (технологічного циклу, сервісного блоку) готельного господарства, по-перше, для стаціонарних готельних закладів, по-друге, для пасажирських транспортних засобів принаймні третього, четвертого та п'ятого рівнів забезпечення готельного сервісу, згідно нашої моделі. Такий підхід, на наш погляд, дозволить більш комплексно представити увесь спектр готельних технологій та сервісів як у стаціонарному, так і в рухомому їх прояві, що в кінцевому підсумку забезпечить більш високу якість послуг та підвищить конкурентоспроможність готельних, транспортних та туристичних підприємств.

Висновки. У процесі обслуговування туристів протягом подорожей наявні різні напрями комбінування та сполучення готельних і транспортних послуг – готелі при хабах, спільність процедур бронювання, транспортний сервіс класичних готельних підприємств, стаціонарні готелі у колишніх рухомих транспортних засобах, та наявність готельного сервісу різного рівня прояву і специфіки на транспортних засобах під час тривалих та далеких перевезень туристів. Останній напрям зумовлює диференціацію глибини застосування готельних технологій на рухомих транспортних засобах залежно від тривалості подорожі, їх конструкції та технічних характеристик.

Вказані обставини дозволили авторам виділити п'ять рівнів готельного забезпечення тривалого туристичного транспортного руху – від надання мінімального сервісу щодо покращення комфорту та зручності ночівель на місцях для сидіння в умовах обмеженого простору салону (класичні туристичні автобуси) до повноцінного диверсифікованого сервісно-виробничого рухомого готельного комплексу з найширшим спектром основних, додаткових та супутніх послуг (великі багатопалубні круїзні лайнери).

Використання даної п'ятирівневої моделі дасть змогу в подальших розробках включити транспортні засоби, під час руху яких при забезпеченні туристичних подорожей найбільш яскраво проявляється готельний сервіс, до важливих складових частин в системі організації готельного господарства, врахувати їх у формуванні національних та інших стандартів готельного обслуговування, що має велике значення для підвищення якості послуг та конкурентоздатності підприємств туристичного, транспортного та готельного бізнесу.

Список використаних джерел:

1. Meet the luxury night bus company redefining overland travel across Europe. URL: <https://surli.lu/pwqeuo>
2. Most Luxurious First-Class Cabins on Trains Around the World. URL: <https://gccmedia.co/culture/luxurious-first-class-cabins-trains-around-world/>
3. Royal Scotsman. A Belmond Train. The Train. URL: <https://www.belmond.com/trains/europe/scotland/belmond-royal-scotsman/about>
4. Twiliner – Europe's first night buses with sleeping seats. URL: <https://surli.cc/bsdomw>
5. Yudina O. I., Nebaba N. O., Saihak Ye. L., Tatarenko D. K. Peculiarities and modern trends in the organization of hotel services. *Системи та технології*. Т. 69. № 1. 2025. С. 300–306.
6. Welcome to Rovos Rail. Great Southern Africa Train Adventures URL: <https://rovos.com/>
7. Андрушків Б. М., Погайдак О. Б., Кирич Н. Б., Керничний Б. Я. Шляхи удосконалення транспортного сервісу у сфері готельно-ресторанного бізнесу. *Review of transport economics and management*. 2020. Вип. 3 (19). С. 99–108.

-
8. Андрущенко О. С. Організація туристичної діяльності: конспект лекцій. Одеса : Одеський державний екологічний університет. 2022. 144 с.
 9. Автобуси Sleep Class. URL: <https://surl.li/cnjegx>
 10. Антоненко І. Я., Мельник І. Л. Формування інноваційного продукту круїзного туризму : монографія. Київ : Сталь, 2016. 248 с.
 11. Бордун О. Ю. Організація транспортного обслуговування туристів : навч. посібник. Львів : Про-стір-М. 2023. 232 с.
 12. Босовська М. В. Інтеграційні процеси в туризмі : монографія. Київ : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2015. 832 с.
 13. Влащенко Н. М. Інноваційні технології у готельному господарстві : навч. посіб. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. 2023. 150 с.
 14. Герасименко В. Г., Галасюк С. С. Організація надання туристичних послуг : навч. посіб. Одеса : Атлант, 2014. 242 с.
 15. Горб К. М., Радиш Я. А. Інтеграція послуг у сфері туризму та гостинності. *Туристичний та готельно-ресторанний бізнес: сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку*: матеріали I міжнародної науково-практичної конференції (м. Старобільськ, 16–17 листопада 2021 року). Старобільськ : Вид-во ДЗ «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка» : Старобільськ. 2021. С. 210–212.
 16. Готелі в аеропортах – 10 найкращих у світі. URL: <https://onlinetickets.world/uk/news/oteli-v-aeroportah-10-luchshih-v-mire>
 17. Готелі в літаках. URL: <https://samolet.fr/ua/gostinicy-v-samoletax/>
 18. Готель, ботель або флотель: азбука готельного бізнесу. URL: <https://surl.li/oiyqyr>
 19. Здоровий спосіб життя на круїзі: фітнес, SPA та здорове харчування. URL: <https://travel-up.com.ua/uk/blog/health-on-cruise/>
 20. Іванов А. М. Особливості організації харчування на круїзних лайнерах. Матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційний розвиток готельно-ресторанного господарства та харчових виробництв» (м. Кривий Ріг, 30 квітня 2021 р.). Прага : Oktan Print s.r.o., 2021. С. 298–299.
 21. Категорії кают на круїзних лайнерах або як вибрати каюту на круїзному лайнері. URL: <https://surl1.cc/ijuhvh>
 22. Крилаті готелі: друге життя літаків і гелікоптерів. URL: <https://turmandry.com.ua/news-posts/krilati-goteli-druge-zhittya-litakiv-i-gelikopteriv/>
 23. Круль Г., Заячук О. Організація і технологія надання послуг гостинності : навч. посіб. Чернівці : Чернівець. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2022. 488 с.
 24. Ляховська С. О. Культура сервісу під час надання послуг харчування в круїзному туризмі. *Культура України*. Вип. 44. 2013. С. 204–211.
 25. Михайліченко Г. І. Туроперейтинг : підручник. Київ : КНТЕУ, 2018. 342 с.
 26. Морські круїзи на найбільших лайнерах світу. URL: <https://goojuicy.com/morski-kruizy-na-najbilshykh-lajnerakh-svitu/>
 27. Наврозова Ю. О. Аспекти якості готельних послуг. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*. 2021. № 1 (74). С. 97–113.
 28. Найбільший круїзний лайнер: подорож у світ гігантів морів. URL: <https://kokl.ua/najbilshyj-kruiznyj-lajner-podorozh-u-svit-gigantiv-moriv/>
 29. Незвичайна ідея в готельному бізнесі: готель у військовому літаку. URL: <https://pro-biznes.com.ua/turizm-i-sport/nezvichajna-ideja-v-gotelnomu-biznesi-gotel-u.html>
 30. Павлова С. І. Особливості та рівні стандартизації готельних послуг. *Сучасні виклики сталого розвитку бізнесу* : тези доп. міжнар. наук. конф. Житомир: Житомирська політехніка. 2020. С. 384–385.
 31. Пешук Л. В., Приходько Д. Ю. Сучасні тенденції розвитку індустрії круїзного туризму в умовах викликів і загроз. *Економіка харчової промисловості*. 2023. Т. 15. Вип. 2. С. 72–79.
 32. Пікулик О. Транспортні послуги в організації туристичної діяльності. *Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. Рекреаційна географія та географія туризму*. № 9 (358). 2017. С. 100–105.
 33. Стандарти обслуговування у готелі: що це і навіщо вони потрібні? URL: <https://blog.auditbloom.com/uk/standarti-obslugovuvannya-u-goteli-sho-ce-i-navisho-voni-potribni/>
 34. Стегней М., Нодь О., Бергхауер О., Прокопець Р. Транспортне забезпечення готельно-ресторанного обслуговування в сучасних умовах розвитку територіальних громад. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2024. № 4. С. 316–321.
 35. Технологія туристичної діяльності : лабораторний практикум / укл. Т. Д. Скутар. Чернівці : Чернівець. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2020. 64 с.
 36. Топорницька М. Я., Загхей Я. А. Транспортні послуги у туризмі: нові горизонти розвитку та система класифікації. Матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. «Сталий розвиток туризму на засадах партнерства: освіта, наука, практика» (м. Львів, 23–24 листопада 2023 р.). Львів: ЛТЕУ, 2018. С. 94–98.
-

37. Хоменчук С. О. Караванінг як вид туризму: переваги та недоліки. *Сучасні виклики сталого розвитку бізнесу: тези виступів II Міжнар. наук.-практ. конф. з пит. вищ. осв. і науки*. Житомир: Житомирська політехніка, 2021. С. 436.

38. Худавердієва В. А. Роль транспортного обслуговування у розвитку індустрії туризму. *Development of management and entrepreneurship methods on transport*. № 3 (80). 2022. С. 98–112.

39. У навколосвітню подорож тепер можна відправитись на літаку-готелі. URL: <https://surl.lt/umtkah>

References:

1. Meet the luxury night bus company redefining overland travel across Europe. Retrieved from: <https://surl.lu/pwqeuo>

2. Most Luxurious First-Class Cabins on Trains Around the World. Retrieved from: <https://gccmedia.co/culture/luxurious-first-class-cabins-trains-around-world/>

3. Royal Scotsman. A Belmond Train. The Train. Retrieved from: <https://www.belmond.com/trains/europe/scotland/belmond-royal-scotsman/about>

4. Twiliner – Europe’s first night buses with sleeping seats. Retrieved from: <https://surli.cc/bsdomw>

5. Yudina, O. I., Nebaba, N. O., Saihak, Ye. L., Tatarenko, D. K. (2025). Peculiarities and modern trends in the organization of hotel services. *Systemy ta tekhnolohii*. T. 69. No. 1. P. 300–306.

6. Welcome to Rovos Rail. Great Southern Africa Train Adventures. Retrieved from: <https://rovos.com/>

7. Andrushkiv, B. M., Pohaidak, O. B., Kyrych, N. B., Kernychnyi, B. Ya. (2020). Shliakhy udoskonalennia transportnoho servisu u sferi hotelno-restorannoho biznesu. *Review of transport economics and management [Ways to improve transport service in the hotel and restaurant business]*. Vyp. 3 (19). P. 99–108.

8. Andrushchenko, O. S. (2022). Orhanizatsiia turystychnoi diialnosti: konspekt lektsii [Organization of tourism activities: lecture notes]. Odesa : Odeskyi derzhavnyi ekolohichnyi universytet. 144 p.

9. Avtobusy Sleep Class [Sleep Class buses]. Retrieved from: <https://surl.li/cnjegx>

10. Antonenko, I. Ya., Melnyk, I. L. (2016). Formuvannia innovatsiinoho produktu kruiznogo turyzmu : monohrafiia [Formation of an innovative cruise tourism product : monograph]. Kyiv : Stal, 248 p.

11. Bordun, O. Yu. (2023). Orhanizatsiia transportnoho obsluhovuvannia turystiv : navch. posibnyk [Organization of tourist transport services: a training manual]. Lviv : Prostir-M. 232 p.

12. Bosovska, M. V. (2015). Intehratsiini protsesy v turyzmi : monohrafiia [Integration processes in tourism: monograph]. Kyiv : Kyiv. nats. torh.-ekon. un-t. 832 p.

13. Vlashchenko, N. M. (2023). Innovatsiini tekhnolohii u hotelnomu hospodarstvi : navch. posib [Innovative technologies in the hotel industry: a training manual]. Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova. 150 p.

14. Herasymenko, V. H., Halasiuk, S. S. (2014). Orhanizatsiia nadannia turystychnykh posluh : navch. posib [Organization of tourist services: a manual]. Odesa : Atlant, 242 p.

15. Horb, K. M., Radysh, Ya. A. (2021). Intehratsiia posluh u sferi turyzmu ta hostynnosti. *Turystychnyi ta hotelno-restoranni biznes: suchasnyi stan, problemy ta perspektivy rozvytku: materialy I mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (m. Starobilsk, 16-17 lystopada 2021 roku)* [Integration of services in the tourism and hospitality sector]. Starobilsk: Vyd-vo DZ “Luhanskyi natsionalnyi universytet imeni Tarasa Shevchenka”: Starobilsk,. P. 210–212.

16. Hoteli v aeroportakh – 10 naikrashchykh u sviti [Airport hotels – the 10 best in the world]. Retrieved from: <https://onlinetickets.world/uk/news/oteli-v-aeroportah-10-luchshih-v-mire>

17. Hoteli v litakakh [Hotels on airplanes]. Retrieved from: <https://samolet.fr/ua/gostinicy-v-samoletax/>

18. Hotel, hotel abo flotel: azbuka hotelnoho biznesu [Hotel, hotel or flotel: the ABCs of the hotel business]. Retrieved from : <https://surl.li/oipyqr>

19. Zdorovy sposib zhyttia na kruizi: fitness, SPA ta zdorove kharchuvannia [Healthy lifestyle on a cruise: fitness, SPA and healthy eating]. Retrieved from: <https://travel-up.com.ua/uk/blog/health-on-cruise/>

20. Ivanov, A. M. (2021). Osoblyvosti orhanizatsii kharchuvannia na kruiznykh lainerakh [Features of catering on cruise ships]. Materialy II Mizhnar. nauk.-prakt. konf. «Innovatsiinyi rozvytok hotelno-restorannoho hospodarstva ta kharchovykh vyrobnytstv» (m. Kryvyi Rih, 30 kvitnia 2021 r.). Praha : Oktan Print s.r.o., P. 298–299.

21. Katehorii kaiut na kruiznykh lainerakh abo yak vybraty kaiutu na kruiznomu laineri [Cruise ship cabin categories or how to choose a cabin on a cruise ship]. Retrieved from: <https://surli.cc/ijuhvh>

22. Krylati hoteli: druhe zhyttia litakiv i helikopteriv [Winged hotels: the second life of airplanes and helicopters]. Retrieved from: <https://turmandry.com.ua/news-posts/krylati-goteli-drughe-zhyttia-litakiv-i-gelikopteriv/>

23. Krul, H., Zaiachuk, O. (2022). Orhanizatsiia i tekhnolohiia nadannia posluh hostynnosti : navch. posib [Organization and technology of providing hospitality services: a manual]. Chernivtsi : Chernivets. nats. un-t im. Yu. Fedkovycha. 488 p.

24. Liakhovska, S. O. (2013). Kultura servisu pid chas nadannia posluh kharchuvannia v kruiznomu turyzmi [Service culture when providing food services in cruise tourism]. *Kultura Ukrainy*. Vypusk 44. P. 204–211.

25. Mykhailichenko, H. I. (2018). Turopereitnyh: pidruchnyk [Tour Operating : a textbook]. Kyiv : KNTEU. 342 p.

-
26. Morski kruizy na najbilshykh lainerakh svitu [Sea cruises on the world's largest liners]. Retrieved from: <https://goojuicy.com/morski-kruizy-na-najbilshykh-lajnerakh-svitu/>
27. Navrozova, Yu. O. (2021). Aspekty yakosti hotelnykh posluh [Aspects of hotel service quality]. *Rozvytok metodiv upravlinnia ta hospodariuvannia na transporti*. No. 1 (74). P. 97–113.
28. Naibilshyi kruiznyi liner: podorozh u svit hiantiv moriv [The largest cruise liner: a journey into the world of giants of the seas]. Retrieved from: <https://kokl.ua/najbilshyj-kruiznyj-lajner-podorozh-u-svit-gigantiv-moriv/>
29. Nezvychajna ideia v hotelnomu biznesi: hotel u viiskovomu litaku [An unusual idea in the hotel business: a hotel in a military aircraft]. Retrieved from: <https://pro-biznes.com.ua/turizm-i-sport/nezvichajna-ideja-v-gotelnomu-biznesi-gotel-u.html>
30. Pavlova, S. I. (2020). Osoblyvosti ta rivni standartyzatsii hotelnykh posluh [Features and levels of standardization of hotel services]. *Suchasni vyklyky staloho rozvytku biznesu : tezy dop. mizhnar. nauk. konf. Zhytomyr: Zhytomyrska politekhnik. P. 384–385.*
31. Peshuk, L. V., Prykhodko, D. Yu. (2023). Suchasni tendentsii rozvytku industrii kruiznoho turyzmu v umovakh vyklykiv i zahroz [Current trends in the development of the cruise tourism industry in the face of challenges and threats]. *Ekonomika kharchovoi promyslovosti*. Tom 15. Vypusk 2. P. 72–79.
32. Pikulyk, O. (2017). Transportni posluhy v orhanizatsii turystychnoi diialnosti [Transport services in the organization of tourist activities]. *Naukovyi visnyk Skhidnoievropeiskoho natsionalnoho universytetu imeni Lesi Ukrainky. Rekreatsiina heohrafiia ta heohrafiia turyzmu*. No. 9 (358). P. 100–105.
33. Standarty obsluhovuvannia u hoteli: shcho tse i navishcho vony potribni? [Hotel service standards: what are they and why are they needed?] Retrieved from: <https://blog.auditbloom.com/uk/standarti-obslugovuvannya-u-goteli-sho-ce-i-navishcho-voni-potribni/>
34. Stehnei, M., Nod, O., Berkhauer, O., Prokopets, R. (2024). Transportne zabezpechennia hotelno-restorannoho obsluhovuvannia v suchasnykh umovakh rozvytku terytorialnykh hromad [Transport provision of hotel and restaurant services in modern conditions of development of territorial communities]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Ekonomichni nauky*. No. 4. P. 316–321.
35. Tekhnolohiia turystychnoi diialnosti : laboratornyi praktykum [Tourism technology: laboratory workshop]. Ukl. T. D. Ckutar (2020). Chernivtsi : Chernivets. nats. un-t im. Yu. Fedkovycha, 64 p.
36. Topornytska, M. Ya., Zatkhei, Ya. A. (2018). Transportni posluhy u turyzmi: novi horyzonty rozvytku ta systema klasyfikatsii [Transport services in tourism: new horizons of development and classification system]. *Materialy III Mizhnar. nauk.-prakt. konf. "Stalyi rozvytok turyzmu na zasadakh partnerstva: osvita, nauka, praktyka"* (m. Lviv, 23-24 lystopada 2023 r.). Lviv : LTEU. P. 94–98.
37. Khomenchuk, S. O. (2021). Karavaninh yak vyd turyzmu: perevahy ta nedoliky [Caravanning as a type of tourism: advantages and disadvantages]. *Suchasni vyklyky staloho rozvytku biznesu: tezy vystupiv II Mizhnar. nauk.-prakt. konf.z pyt. vyshch. osv. i nauky*. Zhytomyr: Zhytomyrska politekhnik, P. 436.
38. Khudaverdiieva, V. A. (2022). Rol transportnoho obsluhovuvannia u rozvytku industrii turyzmu [The role of transport services in the development of the tourism industry]. *Development of management and entrepreneurship methods on transport*. No. 3 (80). P. 98–112.
39. U navkolosvitniu podorozh teper mozha vidpravytys na litaku-hoteli [You can now travel around the world on a plane-hotel]. Retrieved from: <https://surl.lt/umtkah>

Дата першого надходження статті до видання: 30.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

UDC 640.4:001.895

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2026-1-71.26>

Horozhankina N. A., Ph.D. in Geography,
Associate Professor at the Department of International Tourism
and Hotel and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0003-2773-8630

Razinkova M. Yu., Doctor of Economics,
Associate Professor at the Department of International Tourism
and Hotel and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0002-1590-7428

Sabirov O. V., PhD, Associate Professor at the Department
of International Tourism and Hotel and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0001-9436-0477

Mulenko K. O., University of Customs and Finance
ORCID: 0009-0006-4066-5076

INNOVATIVE ACTIVITIES IN THE HOTEL AND RESTAURANT BUSINESS

The features of implementing innovations in the hotel and restaurant business are considered. The description of the “Khimik” hotel, which belongs to the category of two-star accommodation establishments, which provides a wide range of services of average comfort at affordable prices, is provided. It has been established that the organizational structure of the “Khimik” hotel is formed in accordance with the needs of a medium-sized enterprise and includes the main functional units that ensure effective management and guest service. Innovative activities in the “Khimik” hotel are implemented through the introduction of modern technologies aimed at improving service, effective management, saving resources and improving the quality of service. The hotel demonstrates a practical approach to innovation, focused on specific results. The innovative technologies implemented in the activities of the “Khimik” hotel are considered, which contribute to improving the quality of service, management efficiency and safety. It was observed that innovative activities at the “Khimik” hotel are an important component of the development strategy, allowing it to adapt to rapid market changes, increase the efficiency of internal processes and strengthen its position among competitors. Continuous improvement of the technological base and implementation of new innovative solutions opens up prospects for expanding the range of services, improving the level of service and meeting the growing needs of modern customers.

A SWOT-analysis of the innovative activities of the “Khimik” hotel was conducted, identifying key internal advantages that ensure the effective implementation of modern technologies, in particular automated accounting systems, CRM and energy-saving equipment. At the same time, there are certain weaknesses, in particular, budget constraints and insufficient level of IT competence of the staff, which require attention for further development. External opportunities include the potential for expanding digital services, the introduction of new energy-saving technologies, and the growing demand for environmentally responsible service. At the same time, the hotel must consider threats in the form of increased competition, technical risks, changes in legislation, and economic instability.

Based on the analysis, it is recommended to focus on improving staff skills, modernizing equipment, developing environmental initiatives, and strengthening cybersecurity. This will strengthen the hotel's position in the market, improve the quality of service, and ensure the sustainable development of innovative activities.

Key words: innovative activity, hotel and restaurant business, innovations, hotel “Khimik”, SWOT-analysis.

Горожанкіна Н. А., Разінькова М. Ю., Сабіров О. В., Муленко К. О. Інноваційна діяльність в готельно-ресторанному бізнесі

Розглянуто особливості впровадження інновацій у готельно-ресторанному бізнесі. Надано характеристику готелю «Хімік». Встановлено, що організаційна структура готелю «Хімік» сформована відповідно до потреб підприємства середнього масштабу та охоплює основні функціональні підрозділи, що забезпечують ефективне



© N. A. Horozhankina, M. Yu. Razinkova, O. V. Sabirov, K. O. Mulenko, 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

управління і обслуговування гостей. Інноваційна діяльність у готелі «Хімік» реалізується через впровадження сучасних технологій, спрямованих на покращення обслуговування, ефективне управління, економію ресурсів та підвищення якості сервісу. Готель демонструє практичний підхід до інновацій, орієнтований на конкретні результати. Розглянуто впроваджені інноваційні технології в діяльності готелю «Хімік», які сприяють підвищенню якості обслуговування, ефективності управління та безпеки. Простежено, що інноваційна діяльність у готелі «Хімік» є важливою складовою стратегії розвитку, що дозволяє адаптуватися до стрімких змін ринку, підвищувати ефективність внутрішніх процесів та зміцнювати позиції серед конкурентів.

Проведено SWOT-аналіз інноваційної діяльності готелю «Хімік», визначено ключові внутрішні переваги, які забезпечують ефективне впровадження сучасних технологій, зокрема автоматизовані системи обліку, CRM та енергозберігаюче обладнання. Водночас існують певні слабкі сторони, зокрема обмеженість бюджету та недостатній рівень IT-компетенцій персоналу, що потребує уваги для подальшого розвитку готелю. Серед зовнішніх можливостей варто виділити потенціал розширення цифрових сервісів, впровадження нових енергозберігаючих технологій та зростаючий попит на екологічно відповідальний сервіс. Водночас готель має враховувати загрози у вигляді посилення конкуренції, технічних ризиків, змін у законодавстві та економічної нестабільності.

Рекомендовано зосередитися на підвищенні кваліфікації персоналу, модернізації обладнання готелю, розробці екологічних ініціатив та посиленні кібербезпеки. Це дозволить зміцнити позиції готелю на ринку, підвищити якість обслуговування та забезпечити сталий розвиток інноваційної діяльності.

Ключові слова: інноваційна діяльність, готельно-ресторанний бізнес, інновації, готель «Хімік», SWOT-аналіз.

Problem statement. Innovation is a key factor in the competitiveness of enterprises in the modern hotel and restaurant business. Changes in consumer needs, technological development and globalization require rapid adaptation and implementation of new solutions. In conditions of fierce competition, innovations provide a high level of service, increase efficiency and create additional value for customers.

Analysis of recent research and publications. The introduction of new technologies and approaches increases the quality of service, reduces costs, improves the company's image and expands the market. The problem of innovations was studied by V. Baev, V. Borodata, G. Gorina, A. Zayets, V. Kazak, K. Lebedynska, K. Palamarek and others [1; 2; 3; 5; 7; 8; 9], who consider them in the context of technological development, service culture, economic efficiency, sustainable development, organizational environment, psychological readiness of personnel and customer-oriented marketing. However, a significant number of enterprises face difficulties in implementing innovations, which requires a deeper study of theoretical and practical aspects.

Purpose of the article: research into the implementation of innovations in the hotel and restaurant business using the example of the “Khimik” hotel.

Presentation of the main material. The introduction of innovations in the hotel and restaurant business is a key factor in maintaining competitiveness and sustainable development in today's conditions of globalization and dynamic changes in the market environment. This process includes measures aimed at updating services, increasing customer satisfaction, optimizing internal processes, as well as applying the latest technologies to ensure the effective operation of enterprises. The features of the implementation of innovations are determined by the specifics of the industry, which is associated with the quality of service, an individual approach to customers and adaptation to changes in consumer demands [8]. In the process of researching the innovative activities of hotel enterprises, an important stage is the choice of scientific methods that allow for a comprehensive and objective assessment of the effectiveness of the implemented innovations. It should be noted that in the context of the hotel industry, innovations are manifested in the use of modern reservation systems, automation of check-in and check-out processes, and intelligent room management systems. The innovative approach involves expanding the range of services: electronic platforms for communication with customers, personalized offers based on analysis of guest behavior, and the use of big data to forecast demand. Attention is paid to eco-technologies, sustainable tourism, and energy-efficient solutions that reduce costs and create a positive image of companies [4]. The features of implementing innovations in the hotel and restaurant business are presented in Table 1.

In the restaurant business, innovations include new food concepts, integration of quick service technologies, online ordering, smart kitchens, and contactless payment. Alternative formats such as dark kitchens and ghost restaurants, which operate on a delivery basis without a physical location, occupy a special place. The success of innovation depends on management flexibility, team creativity, and the ability to respond to gastronomic trends. An important area is the use of artificial intelligence for sales forecasting, inventory optimization, and marketing personalization [7].

The process of innovative transformation of the hotel and restaurant business involves overcoming a number of challenges. Among them, it is worth highlighting the high cost of implementing new technologies, the need for constant staff training, risks associated with the security of customer data, as well as the difficulty of changing the corporate culture to make innovative decisions [2]. Businesses that seek to succeed in this environment should focus on a systematic approach to innovation, which involves strategic planning, market analysis, trend monitoring, experimentation, and rapid scaling of effective solutions [1].

Let's move on to the characterization and consideration of innovative solutions implemented at the “Khimik” hotel.

Table 1

Features of implementing innovations in the hotel and restaurant business

Innovation implementation area	Example of innovation	Expected effect	Implementation features
Service technologies	Electronic self-check-in system	Shortening queues, convenience for guests	Requires integration with PMS and staff training
Culinary technologies	Molecular cuisine, 3D printing of dishes	Unique experience, attracting new customers	High cost of equipment, qualification required
Process automation	CRM systems, cloud order management	Improvement of efficiency, personalization	Requires setup and technical support
Environmental innovations	Energy-efficient equipment, zero waste	Saving resources, improving image	Requires changes in logistics and procurement
Design and spatial solutions	Modular rooms, flexible zoning	Comfort, adaptability to customer needs	Depends on architectural possibilities
Innovations in service	Robot waiters, voice assistants	Guest experience, staff optimization	Need for maintenance and control
Marketing tools	Augmented reality in advertising, NFT bonuses	Creating the wow effect, engaging young people	Technical partnership needed

Source: [5]

Hotel “Khimik” belongs to the category of two-star accommodation establishments, which provides a wide range of services of average comfort at affordable prices. Located in a relatively remote part of the city of Pavlograd, the hotel is favorably distinguished by its proximity to the water sports complex and the Pavlograd Chemical Plant, which makes it convenient for accommodating employees and guests of the enterprise, as well as visitors to sporting events.

The organizational structure of the “Khimik” hotel is formed in accordance with the needs of a medium-sized enterprise and includes the main functional units that ensure effective management and guest service [3].

The “Khimik” hotel has 50 rooms spread over four floors. Among them are 13 standard single rooms, 9 single rooms with increased comfort, 3 standard double rooms, 22 junior suites and 3 suites [6].

This choice of rooms allows the establishment to accommodate a variety of guests – from single travelers to corporate clients. By offering rooms of different categories, the hotel can effectively compete with others on the market, providing guests with the best value for money. The diversity of the room stock contributes to a high level of occupancy at different times of the year, which allows for a flexible approach to pricing and to meet the needs of guests with different financial capabilities and comfort requirements. This approach not only increases customer satisfaction, but also has a positive impact on the hotel’s financial stability, creating favorable conditions for further development and implementation of new solutions.

Innovative activities at the “Khimik” hotel are implemented through the introduction of modern technologies aimed at improving service, efficient management, saving resources and improving the quality of service. The institution demonstrates a practical approach to innovation, focused on specific results.

The use of innovative technologies in the activities of the research institution “Khimik” is presented in Table 2.

Table 2

The use of innovative technologies in the activities of the “Khimik” hotel

Technology name	Scope of application	Year of implementation	Expected effect	Achieved result
Electronic customer accounting system	Administrative management	2022	Customer service optimization	Registration time reduced by 40 %
CRM-system	Marketing management	2023	Communication personalization	Increasing loyalty of regular customers
Wireless Internet	(Wi-Fi) Guest comfort	2022	Increased convenience and comfort	Ensured coverage of the entire territory
Air conditioning and heating systems	Material and technical base	2022	Increased comfort	Improved climate in rooms
Security Systems	Security	2023	Protecting guests and property	Reducing incidents, improving control

Source: compiled by the authors

Each of the implemented technologies has its own characteristics and purposes, which contribute to increasing the efficiency of the institution. Their brief description allows us to more fully understand the functional significance of innovations in various areas of the enterprise’s activity. This allows us to assess not only the technical level of

implementation, but also the impact of innovations on the quality of service, resource optimization, and overall competitiveness of the hotel. Such analysis is important for determining further directions of development and improvement of the institution's innovation policy [3].

The "Khimik" hotel has already implemented a number of innovative technologies that help improve the quality of service, management efficiency, and safety.

The characteristics of innovative technologies implemented in the activities of the "Khimik" institution are presented in Table 3.

Table 3

Characteristics of innovative technologies implemented in the activities of the institution "Khimik"

Technology name	Characteristics
Electronic customer accounting system	Automated system for guest registration, data storage, booking and payment management. Integration with online platforms. Reduces service time, increases accuracy and personalization of service
CRM system	Customer relationship management system: stores guest profiles, automates marketing, monitors staff work, integrates with payment systems. Increases loyalty and repeat bookings
Wireless Internet (Wi-Fi)	Stable and fast internet in all rooms and public areas, ensuring guest comfort and supporting mobile devices
Air conditioning and heating systems	Modern climate systems with automatic temperature control and energy saving, providing comfortable conditions and reducing energy costs
Security systems	A complex of video surveillance, access control, alarm and emergency notifications that ensures the protection of guests, staff and hotel property

Source: compiled by the authors

One of the important innovations is the electronic customer registration system, which automates the registration and room reservation processes, stores detailed information about guests, their preferences and order history. This system is integrated with popular online booking platforms, which allows you to effectively manage customer flows and reduce service time. This has reduced the time for guest registration by approximately 40 %, which significantly increases the efficiency of the reception and the comfort of visitors [9].

To improve customer engagement and effectively manage marketing activities, the hotel implemented a CRM system. It allows you to store detailed guest profiles, automate personalized offers, monitor staff performance, and analyze customer behavior. This significantly increases customer loyalty and increases repeat bookings, which positively impacts revenue stability [9].

Guest comfort is a priority, so the hotel has provided stable and fast wireless Internet (Wi-Fi) coverage throughout the entire territory. This allows guests to stay connected, work remotely and use modern digital services without restrictions, which enhances the overall impression of their stay at the establishment.

Another important area of innovation is the introduction of modern air conditioning and heating systems that ensure a comfortable microclimate in rooms and public areas. These systems have automatic temperature control and energy saving functions, which allows not only to create comfortable conditions for guests, but also to reduce energy costs.

The safety of guests and staff is a priority for the hotel, which is why a complex of modern security systems has been implemented, including video surveillance, access control, alarm systems and emergency notifications. This significantly reduces the risk of incidents, ensures property protection and creates an atmosphere of peace and trust among visitors.

In general, innovative activities at the "Khimik" hotel are an important component of the development strategy, allowing it to adapt to rapid market changes, increase the efficiency of internal processes, and strengthen its position among competitors. Continuous improvement of the technological base and implementation of new innovative solutions opens up prospects for expanding the range of services, improving the level of service, and meeting the growing needs of modern clients.

Innovative solutions also contribute to the formation of a positive image of the hotel as a modern, technologically equipped and customer-oriented establishment. In the long term, this allows not only to retain regular guests, but also to effectively attract new target audiences.

Innovative activities at the "Khimik" hotel are an important component of the institution's development strategy, aimed at improving the quality of service, optimizing management processes, saving resources, and ensuring competitiveness in the hotel services market. The introduction of modern technologies allows not only to improve guest comfort, but also to increase staff efficiency and reduce operating costs.

The SWOT analysis of the innovative activities of the "Khimik" hotel is presented in Table 4.

The SWOT analysis of the innovative activities of the "Khimik" allows us to identify key internal advantages that ensure the effective implementation of modern technologies, in particular automated accounting systems, CRM

and energy-saving equipment. At the same time, there are certain weaknesses, in particular, budget constraints and insufficient level of IT competence of the staff, which require attention for further development [2].

External opportunities include the potential for expanding digital services, the introduction of new energy-saving technologies, and the growing demand for environmentally responsible service. At the same time, the hotel must consider threats in the form of increased competition, technical risks, changes in legislation, and economic instability.

Based on the analysis, we recommend focusing on improving staff skills, upgrading equipment, developing environmental initiatives, and strengthening cybersecurity. This will strengthen the hotel's position in the market, improve the quality of service, and ensure sustainable development of innovative activities.

In general, the average level of innovative activity reflects the current state of the hotel, which corresponds to the trends in the development of the hotel business in Ukraine. For further growth, we recommend improving technical equipment, improving staff qualifications, and expanding the range of innovative services.

Table 4

SWOT-analysis of the innovative activities of the “Khimik” hotel

		External environment	
		Opportunities	Threats
		1.Expansion of digital services. 2.Introduction of new energy-saving technologies. 3.Staff training. 4.Cooperation with technological partners. 5.Growing demand for environmental services	1. Increased competition. 2. Risks of technical failures and cyberattacks. 3. Changes in legislation. 4. Economic instability. 5. Rising energy prices
Internal environment	Strengths	Strengths and opportunities	Strengths and threats
	1.Automated customer accounting system. 2.CRM system for personalization of service. 3.Stable Wi-Fi. 4.Modern air conditioning and heating systems. 5.Comprehensive security systems	Use CRM and electronic accounting to launch a mobile application with personalized services. Expand the implementation of energy-saving technologies to reduce costs	Strengthen cybersecurity to protect data and systems. Meet new legal requirements for security and privacy
	Weaknesses	Weaknesses and opportunities	Weaknesses and threats
	1.Limited budget for innovation. 2.Insufficient level of IT competence of personnel. 3.Partially outdated equipment. 4.Dependence on suppliers. 5.Lack of environmental initiatives	Organize staff training to improve IT competencies. Engage partners to upgrade outdated equipment. Develop environmental programs and implement relevant initiatives	Develop a disaster recovery plan for systems. Optimize the budget to overcome economic crises

Source: compiled by the authors

Such a comprehensive approach will contribute to increasing the competitiveness and sustainable development of the hotel.

Conclusions. In summary, the main recommendations for achieving the goal of our research are as follows. Hotel “Khimik” actively implements innovative technologies that contribute to increasing management efficiency, optimizing service processes, saving resources and improving service quality. However, the level of innovation application can still be assessed as average, which is due to limited funding, insufficient level of staff qualifications and the lack of a comprehensive strategy for innovative development. To increase competitiveness, it is recommended to develop a clear plan for implementing innovations, invest in training and advanced training of employees, and modernize the material and technical base. This approach will not only improve the quality of services, but also ensure the stable development of the hotel in the face of growing competition. At the same time, it is important to monitor global trends and adapt the best practices of innovation to achieve maximum effect.

Bibliography:

1. Бойко З., Горожанкіна Н., Грушка В. Модернізація систем управління підприємств сфери обслуговування. *Development Service Industry Management*. № 1. 2025. С. 29–34.
2. Бойко З. В., Горожанкіна Н. А., Іванцов С. В. Готельне господарство як складова індустрії гостинності країни (на прикладі Німеччини). *Інфраструктура ринку*. 2023. Вип. 75. С. 214–220.
3. Влащенко Н. М. Інноваційні технології у готельному господарстві: навч. посіб. Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. 2023. 150 с.

-
4. Конкуентоспроможність підприємства: навчальний посібник / І. А. Дмитрієв, І. М. Кирчата, О. М. Шершенюк. Х. : ФОП Бровін О. В., 2020. 340 с.
 5. Романуха О. М., Горіна Г. О., Васильєва В. К. Компаративний аналіз стану розвитку ринку готельних послуг України та країн ЄС. *Торгівля і ринок України*. 2024. № 2(52). С. 127–134.
 6. Готель «Хімік» URL: <http://www.khimic.dp.ua/index.php>
 7. Галасюк К. А. Оцінка інноваційного потенціалу підприємств готельного господарства : дис. ... канд. екон. наук: 08.00.04 / К. А. Галасюк / Одеськ. нац. екон. ун-т. Одеса : 2016. 304 с.
 8. Круковська О. Формування конкурентоспроможності готельно-ресторанного підприємства через ефективний менеджмент. Херсон, 2025. *Економіка та суспільство*. Вип. 74. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/5990>
 9. Савицька Н. Л. Клієнт-орієнтоване управління в готельно-ресторанному бізнесі : монографія / Н. Л. Савицька, Г. Л. Чміль, Н. М. Джгуташвілі. Харків : Видавець Іванченко І. С., 2021. 209 с.

References:

1. Boyko, Z., Horozhankina, N., & Hrushka, V. (2025). Modernizatsiia system upravlinnia pidpriemstv sfery obsluhovuvannia [Modernization of management systems of service enterprises]. *Development Service Industry Management*, 1, 29–34.
2. Boyko, Z. V., Horozhankina, N. A., & Ivantsov, S. V. (2023). Hotelne hospodarstvo yak skladova industrii hostynnosti krainy (na prykladi Nimechchyny) [Hotel industry as a component of the country's hospitality industry (on the example of Germany)]. *Market infrastructure*, 75, 214–220.
3. Vlashchenko, N. M. (2023). Innovatsiini tekhnolohii u hotelnomu hospodarstvi: navch. posib [Innovative technologies in the hotel industry: a textbook]. Kharkiv. National University of Municipal Economics named after O. M. Beketov.
4. Competitiveness of the enterprise: textbook (2020). / I. A. Dmitriev, I. M. Kyrchata, O. M. Shershenyuk. Kh. : FOP Brovin O. V.
5. Romanukha O. M., Gorina G. O., & Vasilyeva V. K. (2024). Komparatyvnyi analiz stanu rozvytku rynku hotelnykh posluh Ukrainy ta krain YS [Comparative analysis of the state of development of the hotel services market in Ukraine and the EU countries]. *Trade and Market of Ukraine*, 2(52), 127–134.
6. Hotel “Khimik”. Retrieved from: <http://www.khimic.dp.ua/index.php>
7. Galasyuk, K. A. (2016). Assessment of the innovative potential of hotel enterprises: dissertation ... candidate of economic sciences: 08.00.04 / Odessa National University of Economics. Odessa.
8. Krukovska, O. V. (2025). Formuvanni konkurentospromozhnosti hotelno-restorannohopidpriemstvacherez efektyvnyimenedzhmen [Formation of competitiveness of hotel and restaurant enterprise through effective management]. *Ekonomika ta suspilstvo* [Economy and society]. Vyp. 74 Retrieved from: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/5990>
9. Savytska, N. L. (2021). Kliient-oriientovane upravlinnia v hotelno-restorannomu biznesi : monohrafiia [Customer-oriented management in the hotel and restaurant business: monograph]. / N. L. Savitskaya, G. L. Chmil, N. M. Dzhgutashvili. Kharkiv : Publisher Ivanchenko I. S.

Дата першого надходження статті до видання: 30.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

UDC 338.24:640.41(045)

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2026-1-71.27>

Kucher M. M., PhD in Economics, Associate Professor,
Department of International Tourism and Hotel and Restaurant
Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0002-3868-5311

Korneyev M. V., Doctor of Economics, Professor,
Dean of the Faculty of Innovative Technologies
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0002-4005-5335

Shcholokova H. V., PhD in Political Sciences, Associate Professor,
Department of International Tourism and Hotel and Restaurant
Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0001-9396-9184

Stepaniuk B. V., University of Customs and Finance
ORCID: 0009-0009-0381-2710

PRACTICAL METHODS OF SERVICE QUALITY MANAGEMENT IN ESTABLISHMENTS OF RESTAURANT INDUSTRY

The article systematises practical methods of managing service quality in restaurant industry establishments (RIEs). Tools for analysing situations and developing ideas for improving quality are identified. Recommendations are provided on selecting the most favourable ideas for this sector. It is established that improving and ensuring service quality are key tasks for restaurant management. Quality management as a direction of activity of RIEs is carried out to improve services continuously and the mechanisms of enterprise activity as well as bring products and services into line with standards. The essence of the concept of "service quality management" in the context of restaurant activity is shown, its components and specifics of assessment are outlined. It has been found that effective quality management requires a comprehensive approach that includes standardisation of service processes, continuous monitoring of customer satisfaction, staff training and the introduction of innovative technologies. Among the tools that determine practical quality management methods, the tools of control, analysis, design, and management are highlighted.

The work is the quintessence of the results of research on the practice of functioning of RIEs. Attention is focused on practical methods and analytical tools that allow negative trends emerging in the activities of RIEs to be identified. In order to identify problem areas in the activity of establishments, it is recommended to conduct a self-assessment using various assessment methods and digital technologies to collect and analyse feedback. Based on the study of the experience of RIEs, the factors that form the quality of restaurant services are characterised. Goals for improving service quality are formulated. It has been established that if measures aimed at continuous and gradual improvement of service quality are insufficiently effective (or lose their effect), it is advisable to resort to a policy of breakthrough improvements.

The practical significance lies in the formulation of recommendations for improving quality management efficiency for managers of RIEs in order to strengthen competitive positions and customer loyalty. The results can be used in the practical activity of RIEs seeking to achieve high standards of service.

Key words: quality management, restaurant industry establishments, service quality, customer loyalty, quality assessment, management methods, management tools.

Кучер М. М., Корнєєв М. В., Щолокова Г. В., Степанюк Б. В. Практичні прийоми управління якістю послуг у закладах ресторанного господарства

У статті систематизовано практичні прийоми управління якістю послуг у закладах ресторанного господарства (ЗРГ). Визначено інструменти аналізу ситуацій та проробки ідей щодо підвищення якості. Надано рекомендації щодо вибору найбільш сприятливих ідей для даної сфери. Встановлено, що підвищення та забезпечення якості послуг



© M. M. Kucher, M. V. Korneyev, H. V. Shcholokova, B. V. Stepaniuk, 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

є ключовими завданнями менеджменту ЗРГ. Управління якістю як напрям діяльності ЗРГ здійснюється з метою постійного вдосконалення послуг і механізмів діяльності підприємств, а також приведення продукції та послуг у відповідність до стандартів. Розкрито сутність поняття «управління якістю послуг» у контексті ресторанної діяльності, окреслено її складові та специфіку оцінювання. Виявлено, що ефективне управління якістю передбачає комплексний підхід, який включає стандартизацію процесів обслуговування, постійний моніторинг задоволеності клієнтів, навчання персоналу та впровадження інноваційних технологій. Серед інструментів, що визначають практичні прийоми управління якістю, виокремлено інструменти контролю, аналізу, проєктування та управління.

Робота є квінтесенцією результатів дослідження практики функціонування ЗРГ. Увага сконцентрована на практичних прийомах і інструментах аналізу, який дозволяє виявити негативні тенденції, що починаються у діяльності ЗРГ. З метою виявлення проблемного поля у діяльності ЗРГ рекомендовано проводити самооцінювання із застосуванням різних методів оцінювання та використання цифрових технологій для збору й аналізу відгуків. На основі вивчення досвіду діяльності ЗРГ охарактеризовано чинники формування якості ресторанних послуг. Сформульовано цілі щодо поліпшення якості послуг. Встановлено, що за умови недостатньої ефективності (або згасання ефекту) заходів, спрямованих на безперервне і поступове поліпшення якості послуг, доцільно вдаватися до політики проривних покращень.

Практична значущість полягає у формуванні рекомендацій щодо підвищення ефективності управління якістю послуг у ЗРГ для посилення конкурентних позицій та лояльності клієнтів. Результати можуть бути використані у практичній діяльності ЗРГ, що прагнуть досягти високих стандартів обслуговування.

Ключові слова: управління якістю, заклади ресторанного господарства, якість послуг, лояльність клієнтів, оцінка якості, прийоми управління, інструменти управління.

Problem statement. The restaurant business is considered one of the most popular segments of the service industry. Growing competition in the restaurant services market and consumer demands for quality services as well as accelerating changes in the preferences of visitors of RIEs are prompting urgent quality issues to be addressed. Service quality is an important factor in competitiveness and a key factor in increasing customer loyalty and improving the long-term reputation of RIEs. Improving and ensuring service quality are key tasks for restaurant management. Underestimating the importance or lacking effective management systems aimed at improving service quality in RIEs inevitably leads to a loss of market position, reduced profitability and, as a result, business decline. In this context, quality management becomes a strategic tool for the development of RIEs. This necessitates the search for and implementation of effective practical methods of service quality management that meet modern customer requirements, international standards, and the strategic objectives of restaurant business development.

Analysis of recent research and publications. Theoretical analysis has shown that the basic definitions and approaches characteristic of quality management are considered in international standards and in many scientific works on quality issues. In particular, the concepts and general requirements for quality are defined by the ISO series of standards.

The following scholars have devoted their works to researching the problematic field of service quality, approaches and features of quality management systems in the restaurant business: O. Krukovska [1], S. Pavlova [2], V. Rusavska [3; 4], M. Riabenska [5], N. Sushko [6] and others. The works of these authors define the principles, problems, and tools of quality management in the restaurant industry, systematise methods and formulate evaluation criteria, analyse approaches to quality assurance, etc. Scientific works emphasise the importance of customer focus, staff training and the introduction of innovative technologies in RIEs, taking into account current trends and sustainable development requirements. However, practical methods and tools for analysing situations and developing ideas for improving quality in this area remain insufficiently researched.

The goal of the article is to identify and systematise practical management methods for achieving high service quality indicators and improving the activity of RIEs.

Presentation of the main material. The essence of the concept of “quality management” can be summarised as follows: it is the purposeful activity of enterprise employees that ensures the continuous improvement of core processes (by core processes we mean business-generating processes), intending to improve the quality of performance results. Quality management as a direction of the activity of RIEs is carried out to continuously improve the restaurant product, services, and directly the mechanisms of activity as well as bring services into line with standards (internal and/or international) [2; 3; 4; 6].

Service quality is an important object of operational and strategic management in the activity of RIEs. High quality of services provided contributes to the formation of restaurant guests’ loyalty and is considered as a basis for increasing the profit and economic stability of RIEs.

The quality of restaurant services has the following characteristics: it is closely related to consumer value, as the latter characterises the ability of a service to satisfy a specific customer need; it is related to the service process, as the service must be “provided correctly”; it is constant [5].

The typical structure of service quality in RIEs (restaurant services) is determined by the quality of the products produced (tasty, healthy, safe, and aesthetically pleasing) and the quality of service (service provision).

Quality management is carried out in accordance with generally accepted stages: goal setting, situation assessment, problem identification, and decision implementation. Goal setting includes operations for developing, formulating, and setting goals for the activity of RIEs. Situation assessment and problem identification are carried out

in the process of implementing the function of controlling inputs, outputs and the activities themselves by assessing the degree of deviation of the current state from the target state (by comparing a set of target process indicators). This comparison triggers a “quality loop” – from the identified deviation, through the analysis of information and the development of corrective measures and operational decisions, to the implementation of changes that contribute to improvement. In other words, analytical research is used to establish the causes of the situation and identify the root causes of the gap between the target and achieved quality levels. Once the causes have been established, measures to improve the situation are proposed. At the final stage, all that remains is to implement the decisions, introduce the changes and monitor the results achieved.

Practical quality management tools begin with formalising objectives and identifying gaps in indicators as well as highlighting key areas for problem-solving.

Among the tools that determine practical quality management methods, the following types can be distinguished:

- control tools that allow monitoring the implementation of quality improvement methods and adjusting influences based on interim results;
- analysis tools that allow, based on data, facts, surveys and observations, to identify the reasons for the quality not meeting the required level and to develop solutions in accordance with the specifics of the situation and available resources;
- design tools that enable the development of new products and services that meet the needs of a potential consumer, with clearly defined quality targets and the scope of functions of new products or services;
- management tools that enable effective communication of all orders and instructions related to the implementation of processes to executors as well as the creation and maintenance of a corporate philosophy focused on employee engagement in ideas and the implementation of continuous improvement.

Next, we will focus on practical methods and analysis tools that allow us to identify negative trends emerging in the activity of RIEs that lead to a weakening of their competitive advantages.

Quality management in RIEs is based on knowledge of the factors that form and evaluate the quality of restaurant services [7]. This makes it possible to more accurately diagnose the strengths and weaknesses of operations of RIEs, make informed management decisions and contribute to increasing customer focus and ensuring the sustainable development of the establishment.

With increasing competition in the restaurant services market, six groups of factors are gaining increasing attention, the content-related characteristic of which is presented in Table 1.

Each of these factors has its own dimension. These dimensions are typically used in the operational activity of RIEs to monitor service quality.

Dimensions of the restaurant services quality are described using variables, which are grouped into six blocks: conditions (how pleasant and comfortable the place is perceived to be), accessibility (how easy it is to get to the restaurant), staff (hospitality and knowledge of the menu, speed of service), atmosphere (how pleasant the atmosphere is in the establishment), food (how well the dishes are prepared and the size of the portions) as well as consistency and honesty (consistency in the provision of services).

Each of these factors can be described using qualitative and quantitative indicators (Table 2). Qualitative parameters are more difficult to formalise and mainly describe the process of service provision and its ability to meet consumer needs, while quantitative parameters allow the results of service provision to be assessed.

Various methods and tools can be used to measure service quality indicators, including customer surveys, monitoring and analysis of feedback on social media or websites of RIEs, food and drinks tasting, internal audits and checks by restaurant management, staff evaluations, etc. The most common methods and tools for assessing service quality in restaurants are listed in Table 3.

It should be noted that the quality of dishes and drinks is assessed using indicators that are divided into three groups: physical and chemical, organoleptic, and microbiological indicators, the values of which are specified in the technical conditions [10].

Since the restaurant business is focused on providing intangible services that are often subjectively evaluated, it is important to consider both the existing and latent (psychological) aspects of customer interaction. The choice of quality measurement tool depends on the object of measurement and the aspect of interaction with the consumer – the restaurant guest.

The assessment of the quality of restaurant services precedes standardisation, certification, the determination of optimal parameters, etc., which contributes to the effective management of restaurant guests’ consumer expectations and the adaptation of establishments to changing market requirements.

Quality control makes it possible to manage activities on acceptable terms as well as to develop and implement measures to correct the process. The following types of control can be used to perform control functions: technical and technological, sanitary and bacteriological, environmental, safety, and metrological.

An effective quality management system (QMS) for restaurant services involves systematic control at all stages of service, continuous training and motivation of staff, and prompt response to customer feedback (Figure 1).

Table 1

The content-related characteristic of factors affecting the quality of restaurant services

Dimension	Variable	Definition
Conditions	Interior and exterior (colours, finishes, design)	Physical characteristics that a customer perceives at first glance, such as colours, finishes, and the design of premises
	Comfort	Comfortable furniture and space
	Hygiene	Cleanliness of premises and tableware
Accessibility	Location	Ease of access
	Parking	Possibility of secure parking
	Payment options	Payment options and methods offered by the establishment (cash, cards, vouchers, etc.)
Staff	Reception and courtesy	Friendly attitude towards visitors to the establishment
	Knowledge and skills (experience)	Level of staff knowledge about food
	Appearance	Appearance of staff
	Speed	The degree of efficiency with which staff respond to visitor requests
	Attentive attitude of staff	A sense of politeness, understanding of needs, confidence, and attitude
Atmosphere	Audiovisual environment	Musical accompaniment, noise level
	Lighting	Appropriate lighting according to the type of restaurant
	Aroma	The aroma of dishes, absence of unpleasant odours (kitchen)
	Temperature	The climate in the establishment, created for the comfort of visitors
	Self-identification with user types	How closely the establishment is identified with the type of customers who visit the restaurant
Food	Taste	Food and drinks should have a pleasant taste
	Smell	Perception of a pleasant aroma by smell
	Variety	Variety of menus
	Serving (presentation)	Visually appealing food, aesthetic presentation of dishes
	Hygiene of food products	Food products are clean
	Freshness of food products	Food that is in good condition and retains its natural properties
	Temperature	Food at the right temperature: hot dishes are served hot, and cold dishes are served cold
Consistency and honesty	Standardised service	The customer receives the same quality of service under all circumstances
	Prestige	The customer feels that the restaurant has a certain level of recognition
	Attention to complaints	Prompt and adequate response to complaints

Source: developed by the authors based on [7]

The implementation and support of such a system allows not only to improve the quality of services, but also to optimise operational processes, reduce costs, increase productivity and, as a result, significantly increase the overall efficiency of a restaurant.

Quality assurance includes activities in a QMS aimed at creating a set of conditions for the compliance of restaurant services with established quality requirements (Figure 2). This subsystem includes internal QMS audits of the establishment and other preventive actions provided for by the ISO 9000 series standard.

The culture of formalising goals and defining them based on achieved and expected trends has been shaped over many years. Self-assessment helps to avoid mistakes in this process by analysing and identifying negative trends (events) in the activity of RIEs.

The analysis of negative trends identified in the process of summarising the experience of the activity of RIEs made it possible to set targets for the future. These targets can be seen as the start of the PDCA cycle, which corresponds to the planning (Plan) step of the target values of expected results.

The decomposition of goals by management levels aimed at achieving high quality and profitability indicators of RIEs is presented in Table 4.

The goals listed in Table 4 are grouped into four directions.

Goal 1. Cost reduction can be achieved by reducing food losses and reducing cost items such as salary expenses.

Goal 2. It is necessary to continuously improve the quality of service and dishes by improving quality control, monitoring the speed of service, maintaining feedback with restaurant guests, etc.

Goal 3. It is necessary to work with each restaurant guest to increase their loyalty to the establishment. This can include incentivising loyal customers, creating a comfortable atmosphere in the establishment, working with

Table 2

Indicators for assessing the quality of services in restaurants

Quality aspect	Qualitative indicators	Quantitative indicators
Food and drinks	quality of food and drinks: – freshness of ingredients; – compliance with the recipe; – aesthetics of presentation; – taste sensations; – presence/absence of ingredients/allergens	– average number of complaints about the quality of dishes; – % of returns of dishes; – % of local products used; – etc.
Service	staff behaviour: – friendliness; – attentiveness; – quick response; – knowledge of the menu; – conflict resolution skills; – flexibility in solving problems and responding to customer requests; – individual approach to customers; – language skills	– average waiting time for a visitor for an order (from arrival to an order, from an order to serving, from serving to payment, etc.); – customer service time (order and payment process); – % of compliance of order, offer, and request; – number of service complaints; – % of repeat visits; – average bill; – etc.
Atmosphere	pleasant atmosphere and environment: – cleanliness and order; – comfort; – lighting; – musical accompaniment; – interior design; – aroma in the hall	– temperature in the hall; – noise level (dB); – number of reviews about the atmosphere; – etc.
Price/Value	pricing policy and price-quality ratio: – fairness of price; – meeting expectations; – perception of “profitability”; – offers	– average bill; – number of promotional offers; – percentage of customers who have used the loyalty programme
Accessibility	– ease of booking; – availability of parking; – clarity of location; – availability of information about dishes and services (menu, prices, promotions, etc.)	– waiting time for a free table; – % of successful online reservations; – etc.

Source: developed by the authors based on [8; 9]

Table 3

Methods of assessment and tools for determining the quality of services in restaurants

Tools	Explanation
Surveying and interviewing customers about their experience visiting the restaurant	the SERVQUAL model – assessment of expectations and perceptions on a 7-point Likert scale (22 questions grouped into 5 blocks); calculation of the Net Promoter Score (NPS) – answer to the question “Would you recommend our restaurant to a friend/colleague?”; calculation of the aggregate Customer Satisfaction Index (CSI) based on multiple assessments; mystery shopping methodology.
Analysis of online reviews and ratings	monitoring customer reviews on social media, online platforms (Google Maps, TripAdvisor, Facebook, Instagram, etc.) and other media
Testing dishes	conducting tastings of dishes and evaluating their quality, including taste
Audit	verification of the actual level of service against internal standards
Analysis of financial indicators	determining the average bill, profit, expenses, and other financial indicators of the restaurant’s activities
Staff assessment	assessment of the level of professional training of staff and their ability to communicate with customers

Source: developed by the authors based on [1; 11]

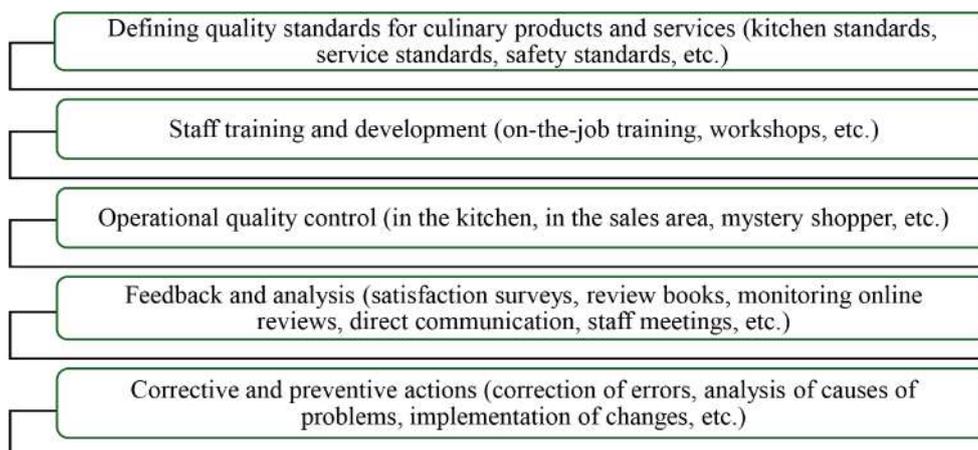


Fig. 1. Key elements of a QMS in a restaurant

Source: developed by the authors



Fig. 2. Conditions for compliance of restaurant services with established quality requirements

Source: developed by the authors based on [12]

dissatisfied customers and resolving conflict situations. PR campaigns and marketing are very important in terms of stimulating customer loyalty and creating the establishment's image.

Goal 4 involves the development and implementation of sustainable development strategies, including technological development, throughout the entire restaurant product production chain, especially at the stage of service implementation in accordance with the modern philosophy of the relationship between the seller and the buyer of services.

The analysis has shown that if measures aimed at continuous and gradual improvement of service quality are insufficiently effective (or their effect is fading), it is advisable to resort to a policy of breakthrough improvements. The combination of breakthrough (referring to the Hoshin Kanri strategic management and planning system) and gradual improvements (referring to the Kaizen management system) in practical implementation can significantly improve the quality of services in RIEs.

Goals aimed at achieving high quality and profitability indicators of a restaurant

First-order goals	Second-order goals	Third-order goals
1. Reducing the costs of dishes and operating expenses	1.1. Reducing product losses	1.1.1. Reducing the risk of food spoilage: optimisation of warehouse accounting; improvement of storage conditions (temperature, humidity). 1.1.2. Minimising waste during preparation: training staff in the efficient use of ingredients; reviewing and optimising portion sizes
	1.2. Reducing personnel costs	1.2.1. Optimisation of staff work schedules. 1.2.2. Increasing productivity through training and automation
2. Improving the quality of service and dishes	2.1. Improving quality control of dishes	2.1.1. Compliance with preparation standards and quality control: development of detailed recipe cards; conducting regular tastings and inspections. 2.1.2. Ingredient quality control: quality control of raw materials and semi-finished products from suppliers; product intake control system
	2.2. Improving service efficiency	2.2.1. Installation of order tracking devices and reduction of order fulfilment time: introduction of a POS system for fast order taking; monitoring of food delivery time. 2.2.2. Service quality control programme directly with guests: collection of feedback (questionnaires, QR codes for reviews); analysis of reviews on online platforms (Google Maps, Facebook)
3. Working with clients (guests)	3.1. Stimulating loyal customers	3.1.1. Running promotions and developing loyalty programmes: accumulative bonuses, discounts for regular guests; personalised offers. 3.1.2. Improving comfort and atmosphere in the establishment: regular updating of interiors and equipment; providing pleasant musical accompaniment
	3.2. Working with dissatisfied customers and resolving conflicts	3.2.1. Quick response to complaints: training staff in effective problem solving; the possibility of free replacement of the dish or compensation. 3.2.2. Analysis of reasons for dissatisfaction: keeping a complaints log and analysing them; making changes to processes based on feedback
4. The concept of sustainable development and innovation	4.1. Development and implementation of a sustainable development strategy for a restaurant	4.1.1. Socio-economic development of a restaurant implementation of staff training and development programmes; supporting local suppliers and producers. 4.1.2. Implementation of modern technologies: process automation (online booking, electronic menu); using energy-efficient equipment

Source: developed by the authors

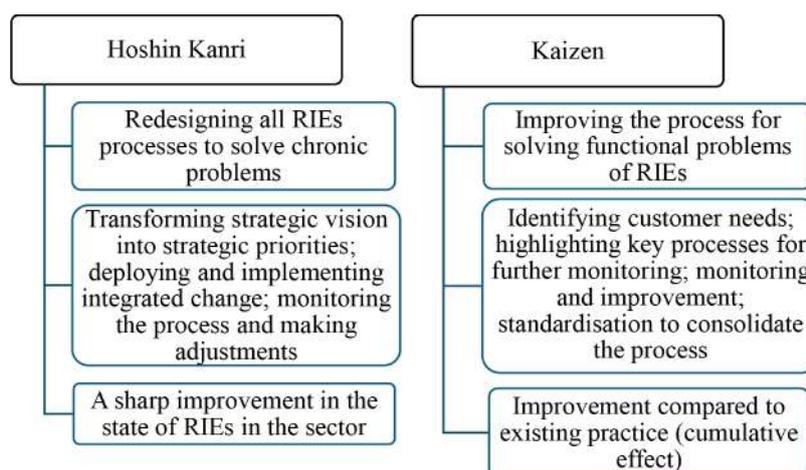


Fig. 3. The essence of breakthrough and gradual improvements in quality management in RIEs

Source: developed by the authors

The characteristic of breakthrough and gradual approaches to improving the quality of services in RIEs is illustrated in Figure 3.

A QMS is a system-forming organisational structure that permeates the entire enterprise. Therefore, almost any significant improvement to it must be implemented as a project and managed in accordance with the specifics of the attitude to breakthrough changes in RIEs.

Conclusions. The quality of services in RIEs is a determining factor in competitiveness, customer loyalty and their long-term economic stability. Quality management should be viewed as a strategic development tool that combines process standardisation, continuous monitoring, staff training, and the use of modern technologies. Practical quality management tools begin with formalising goals and identifying gaps in performance indicators as well as identifying key areas for problem-solving. Among the tools that define practical quality management methods are control, analysis, design, and management tools. Practical assessment tools (questionnaires, the SERVQUAL, mystery shopping, online review analysis, internal audits) ensure objective control and help to make timely adjustments to activities. The results of the analysis of negative trends identified in the process of summarising the experience of the activity of RIEs made it possible to set targets for the future, in particular for the development of a service quality improvement programme. The main goals for improving the quality and increasing the profitability of RIEs include: reducing the cost of dishes and operating expenses; improving the quality of service and dishes; increasing customer loyalty to the establishment; and developing and implementing sustainable development strategies, including technological development.

Bibliography:

1. Круковська О. В. Оцінка якості продукції та послуг готельно-ресторанного бізнесу. *Економіка та суспільство*. 2023. № 56. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/2984/2903>
2. Павлова С. І. Управління якістю послуг ресторану через механізми впровадження внутрішніх стандартів обслуговування. *Економіка та суспільство*. 2021. № 34. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/988>
3. Русавська В. А., Піскун О. В. Сучасні критерії оцінки ефективності системи управління якістю ресторанного підприємства: інтеграція стандартів ISO та аналітики Big Data. *Причорноморські економічні студії*. 2025. Вип. 93. С. 258–265.
4. Русавська В. А. Удосконалення системи управління якістю продукції та послуг в закладах ресторанного бізнесу на основі міжнародних принципів управління якістю. *Економіка та суспільство*. 2025. Вип. 71. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/5556>
5. Рябенька М. О. Оцінка якості послуг у готелях і ресторанах. *Причорноморські економічні студії*. 2020. Вип. 52-2. С. 46–51.
6. Сушко Н. Сучасні інструменти управління якістю послуг у готельно-ресторанному господарстві. *Acta Academiae Beregsasiensis. Economics*. 2025. Вип. 8. С. 254–266.
7. Грибик І., Смолінська Н., Комаровський В. Фактори оцінки якості закладів харчової індустрії. *Development Service Industry Management*. 2024. № 1. С. 56–65.
8. López Salas S. Atención al cliente, consumidor y usuario. Ediciones Paraninfo, S.A., 2020. 270 p.
9. Saneva D., Chortoseva S. Service quality in restaurants: customers' expectation and customers' perception. *SAR Journal*. 2018. Vol. 1, Issue 2. P. 47–52.
10. Готельно-ресторанний бізнес: навч. посібник. / О. А. Ніколайчук, Н. С. Приймак, О. А. Сімакова та ін.; ред. О. А. Ніколайчук. Кривий Ріг : Вид. ДонНУЕТ, 2022. 250 с.
11. Бедрадіна Г. К., Кузьмічова К. А. Методи оцінювання якості обслуговування на підприємствах ресторанного бізнесу. *Причорноморські економічні студії*. 2020. Вип. 55-1. С. 78–82.
12. Силівейстер В. Організація контролю якості у ресторані. Контроль якості та обслуговування в ресторані. *Офіційний сайт Poster*. 2021. URL: <https://joinposter.com/ua/post/kontrol-yakosti-v-restorani>

References:

1. Krukovska, O. V. (2023). Otsinka yakosti produktsii ta posluh hotelno-restorannoho biznesu [Assessment of the quality of products and services in the hotel and restaurant business]. *Ekonomika ta suspilstvo*. № 56. Retrieved from: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/2984/2903>
2. Pavlova, S. I. (2021). Upravlinnia yakistiu posluh restoranu cherez mekhanizmy vprovadzhenia vnutrishnikh standartiv obsluhovuvannia [Quality management of restaurant services through the mechanisms of implementing internal service standards]. *Ekonomika ta suspilstvo*. № 34. Retrieved from: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/988>
3. Rusavska, V. A., & Piskun, O. V. (2025). Suchasni kryterii otsinky efektyvnosti systemy upravlinnia yakistiu restoranoho pidpriemstva: intehratsiia standartiv ISO ta analyky Big Data [Modern criteria for evaluating the effectiveness of the quality management system of a restaurant enterprise: integration of ISO standards and Big Data analytics]. *Prychornomorski ekonomichni studii*. Vyp. 93, 258–265.
4. Rusavska, V. A. (2025). Udoshkonalennia systemy upravlinnia yakistiu produktsii ta posluh v zakladakh restoranoho biznesu na osnovi mizhnarodnykh pryntsyviv upravlinnia yakistiu [Improvement of the quality management system for products and services in restaurant business enterprises based on international principles of quality management]. *Ekonomika ta suspilstvo*. Vyp. 71. Retrieved from: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/5556>

-
5. Riabenka, M. O. (2020). Otsinka yakosti posluh u hoteliakh i restoranakh [Assessment of service quality in hotels and restaurants]. *Prychornomorski ekonomichni studii* [. Vyp. 52, ch. 2, 46–51.
 6. Sushko, N. (2025). Suchasni instrumenty upravlinnia yakistiu posluh u hotelno-restorannomu hospodarstvi [Modern tools for quality management of services in the hotel and restaurant industry]. *Acta Academiae Beregsasiensis. Economics*. Vyp. 8, 254–266.
 7. Hrybyk, K., Smolinska, N., & Komarovskiy, V. (2024). Faktory otsinky yakosti zakladiv kharchovoi industrii [Factors for assessing the quality of food industry establishments]. *Development Service Industry Management*, 1, 56–65.
 8. López Salas, S. (2020). Atención al cliente, consumidor y usuario [Customer service for consumers and users]. Ediciones Paraninfo, S.A.
 9. Saneva, D., & Chortoseva, S. (2018). Service quality in restaurants: customers expectation and customers perception. *SAR journal*, 1(2), 47–52.
 10. Hotelno-restoranni biznes [Hotel and restaurant business]: navch. posibnyk. / O. A. Nikolaichuk, N. S. Pryimak, O. A. Simakova ta in.; red. O. A. Nikolaichuk. (2022). Kryvyi Rih : Vyd. DonNUET.
 11. Bedradina, H. K., & Kuzmichova, K. A. (2020). Metody otsiniuvannia yakosti obsluhovuvannia na pidpriemstvakh restorannoho biznesu [Methods of evaluating service quality in restaurant business enterprises]. *Prychornomorski ekonomichni studii*. Vyp. 55-1, 78–82.
 12. Sylveister, V. (2021). Orhanizatsiia kontroliu yakosti u restorani. Kontrol yakosti ta obsluhovuvannia v restorani [Organisation of quality control in a restaurant. Quality control and service in a restaurant]. *Ofitsiyni sait Poster*. Retrieved from: <https://joinposter.com/ua/post/kontrol-yakosti-v-restorani>

Дата першого надходження статті до видання: 30.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

UDC 336.22:[640.43:502.131.1]

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2026-1-71.28>

Stebliuk N. F., PhD in Economics,
Associate Professor at the Department of International Tourism and
Hotel and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0002-4488-769X

Horozhankina N. A., Ph.D. in Geography,
Associate Professor at the Department of International Tourism and
Hotel and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0003-2773-8630

Nebaba N. O., Doctor of Economics,
Professor at the Department of Economic Modeling, Accounting
and Statistics
Oles Honchar Dnipro National University
ORCID: 0000-0003-1264-106X

Shapoval K. O.,
University of Customs and Finance
ORCID: 0009-0000-2025-599X

OPTIMIZATION OF TAXATION OF RESTAURANT BUSINESS ESTABLISHMENTS IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

The article analyzes the taxation systems of restaurant businesses in Ukraine, considering their organizational and legal status. The purpose of the study is to substantiate the theoretical and methodological foundations for the use of mechanisms of tax optimization in restaurant business establishments in the context of sustainable development. The peculiarities of applying the simplified and general taxation systems are examined, along with the specifics of tax regulation in this sector. It is substantiated that the modern restaurant business requires effective tax mechanisms that ensure not only a reduction in the tax burden but also the financial stability of enterprises, promote the formation of social responsibility, and create conditions for investment in ecological practices. A scenario-based approach to determining the level of tax burden is proposed, demonstrating significant differences among enterprises operating under various organizational and legal forms and applying different tax regimes. The practical significance of the research lies in utilizing the proposed approach to select optimal taxation models for restaurant establishments in the context of sustainable development. This contributes to reducing the tax burden, enhancing financial stability, and adapting enterprises to modern challenges caused by the martial law. Prospects for further research involve the application of modeling optimization strategies as a vital tool for analyzing and forecasting the results of implementing tax measures.

Key words: taxes, scenarios, restaurant, simplified taxation system, general taxation system, tax burden, optimization.

Стеблюк Н. Ф., Горозжанкіна Н. А., Небаба Н. О., Шаповал К. О. Оптимізація оподаткування закладів ресторанного бізнесу в контексті сталого розвитку

У статті проаналізовано системи оподаткування підприємств ресторанного бізнесу в Україні з урахуванням їхнього організаційно-правового статусу. Розглянуто особливості застосування спрощеної та загальної систем оподаткування, а також специфіку податкового регулювання у цій сфері. Метою дослідження є обґрунтування теоретико-методичних засад використання механізмів оптимізації оподаткування закладів ресторанного бізнесу в контексті сталого розвитку. Визначено, що сучасний ресторанний бізнес потребує ефективних податкових механізмів, які забезпечують не лише зниження рівня податкового навантаження, а й фінансову стійкість підприємств, сприяють формуванню соціальної відповідальності та створюють умови для інвестицій у екологічні практики. Запропоновано сценарний підхід до визначення рівня податкового навантаження, що демонструє суттєві відмінності між підприємствами, які функціонують у різних організаційно-правових формах та застосовують різні режими оподаткування. Практичне значення дослідження полягає у використанні запропонованого підходу для вибору



© N. F. Stebliuk, N. A. Horozhankina, N. O. Nebaba, K. O. Shapoval, 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

оптимальних моделей оподаткування закладів ресторанного бізнесу в умовах сталого розвитку, що сприяє зниженню податкового навантаження, підвищенню фінансової стійкості та адаптації підприємств до сучасних викликів, зумовлених воєнним станом. Перспективи подальших досліджень передбачають застосування моделювання стратегій оптимізації як важливого інструменту аналізу та прогнозування результатів впровадження податкових заходів.

Ключові слова: податки, сценарії, ресторан, спрощена система оподаткування, загальна система оподаткування, податкове навантаження, оптимізація.

Problem statement. Tax legislation is an important component of the financial management of restaurant businesses, as it directly determines the level of tax burden and affects the overall financial stability of the establishment. In conditions of martial law and economic instability, the relevance of the problem of tax optimization is significantly increasing, as the high level of tax burden and the complexity of administration create additional risks for the functioning of the industry.

Tax optimization is a complex process that should be based exclusively on tools and methods permitted by law, ensuring the minimization of tax risks and increasing the efficiency of financial management. The need to develop scenarios for optimizing tax payments is due to the need to reduce tax risks and increase the efficiency of financial management, which is an important prerequisite for sustainable business development.

Analysis of recent research and publications. The impact of the tax burden on the performance of business entities is constantly in the focus of economic science. The issue of tax burden management at the enterprise level was considered in the works of Ukrainian scientists: K.Andriienko [1], O.Artyukh [1; 3], K.Haiduk [3], I.Levytska [2], A.Klymchuk [2], S.Zakharova [2], N.Matviichuk [4], S.Tesliuk [4], A.Ploskina [4], D.Pysarchuk [4], V.Sharmanska [5], T.Zaverukha [5] and others. Researchers focus on the key problems of modern tax policy: frequent changes in legislation, excessive taxes and fees, blocking of tax invoices, low resilience to global challenges, and insufficient level of digital integration [6; 7; 8]. The works of scientists [5; 8; 9] indicate that tax optimization is a tactical tool of a short- and medium-term nature, aimed at adapting the taxpayer to the features of the tax system and choosing the most favorable taxation regime. Tax optimization as a legitimate economic and legal activity is determined by the process of rational selection of the optimal model of organization of fiscal and economic relations, aimed at minimizing tax costs, subject to compliance with current legislation. Thanks to this, the enterprise can more effectively allocate financial resources, invest in the development of production and innovation, which contributes to the implementation of sustainable practices in business. Scientists [10; 11] propose different approaches to determining the level of tax burden. In the scientific literature, both quantitative and qualitative criteria for its assessment are distinguished. Quantitative indicators are based on an analysis of the ratio of taxes paid to the financial results of the enterprise, the level of profitability, the structure of costs and production volumes. Qualitative criteria take into account industry characteristics, investment activity, the degree of impact of the tax system on business competitiveness and overall economic development. Therefore, the tax burden is considered as a complex indicator that reflects not only the fiscal function of the state, but also the regulatory impact of tax policy on economic activity [8; 9]. O.Iarmolitska [10] emphasizes the need to improve the mechanism for managing the activities of restaurant business establishments, taking into account the specifics of accounting and taxation. The proposed approach is aimed at optimizing the tax burden, ensuring transparency of financial flows, increasing the effectiveness of management decisions, and creating the prerequisites for the sustainable development of enterprises in the restaurant business.

Paying tribute to the scientific achievements of scientists, it should be noted that the issue of optimizing the tax burden in the restaurant business requires further scientific study and development of practical recommendations.

Purpose of the article: to substantiate the theoretical and methodological principles of using mechanisms for optimizing taxation of restaurant business establishments in the context of sustainable development.

Presentation of the main material. Taxes constitute one of the most significant items of expenditure for enterprises and directly affect their profitability, solvency, competitiveness, investment activity, and overall financial condition. Effective management of tax expenditures, rational use of tax benefits, and optimization of the tax burden are critically important for ensuring stable financial and economic activities of enterprises, especially in conditions of economic instability (Table 1) [1; 2].

The effectiveness of the formation of the tax burden in the restaurant business largely depends on the characteristics of the taxation system applied by the enterprise. The decisive factors in this case are the code of the type of economic activity (KVED), the organizational and legal form of the business entity, the applicable tax system, as well as the availability of relevant licenses, in particular for the sale of alcoholic and tobacco products. If a business entity in the restaurant sector has such licenses, current tax legislation requires the application of a general taxation system, regardless of the chosen organizational and legal form.

A comparison of the choice between an individual entrepreneur (IEP) or a limited liability company (LLC) for hotel and restaurant businesses, taking into account the advantages and disadvantages of each organizational and legal form, is given in Tables 2 and 3.

Given the constant changes in the tax environment, the issue of forming a relevant analytical basis for making management decisions is becoming particularly important. Effective tax management requires the construction of

Table 1

Directions of influence of tax payments on the activities of enterprises

Directions	Characteristic	Consequences for the enterprise
Cost formation and pricing	Taxes are included in the cost of products (works, services), which affects the final sales price	Rising prices can reduce competitiveness, lead to a decrease in sales volumes, and loss of sales markets
Financial condition and liquidity	Taxes immobilize a company's working capital, reducing the financial resources available for operating activities	Limited opportunities for investment, development, and covering current expenses; risk of financial difficulties
Tax burden	High tax rates, especially VAT, income tax and social contributions, create a significant burden on businesses	Declining profitability, slowing development, stimulating shadow activities, and reducing investment activity
Solvency and financial stability	Taxes affect the ability to fulfill one's obligations to counterparties and creditors	Deterioration of financial stability, risk of insolvency, bankruptcy
Investment activity	Tax rates and benefits affect the attractiveness of a company's investment projects	Possibility of attracting or losing investments, impact on innovative development
Administrative costs	Maintaining tax records, reporting, and interacting with tax authorities create additional costs and burdens	Increased management costs, the need to attract specialists, which affects the overall efficiency of the business

Source: [1; 3; 4]

Table 2

Main advantages and disadvantages of LLC activities

Advantages of LLC	Disadvantages of LLC
No income restrictions	More complex document management and strict cash discipline
There are no restrictions on the number of employees	The founder of an LLC cannot use the LLC's funds for his own needs
There are no restrictions on types of activities	Dividends must be paid 5 % personal income tax + 5 % military levy (general taxation system); 9 % personal income tax + 5 % military levy for simplified taxation system
In the general system, tax is paid on profits	
Liability limited to business assets	
Can book employees	
Partnership opportunity	

Source: [13]

Table 3

The main advantages and disadvantages of individual entrepreneurs

Advantages of IEPs	Disadvantages of IEPs
Quick and free registration	Responsible with all his property
Simple reporting form	There are restrictions on income per year
You can manage the funds of an individual entrepreneur	There are restrictions on the number of employees
Low taxes	There are restrictions on types of activities
	Tax is paid on income in the third group
	Cannot book employees and themselves

Source: [13]

a system for describing tax parameters that allows not only to assess the current state of the enterprise, but also to forecast its financial position, taking into account possible changes in the tax burden. It should be noted that this ensures the adaptability of the enterprise's tax strategy to external conditions and increases the validity of management decisions in the field of tax planning [4].

A special tax regime has been operating in Ukraine since 1999 – a simplified tax system (STS) for small businesses. The application of STS applies to both individual entrepreneurs (IEPs) and legal entities. Business entities operating under this system are divided into four groups depending on the maximum amount of income, the level of the tax rate, permitted types of economic activity, and the possibility of using the labor of employees. Choosing the optimal tax model plays a key role in ensuring the long-term stability of a business, especially in highly competitive industries such as the hotel and restaurant sector. Each of these models has its own advantages in terms of the amount of tax burden, which must be carefully considered when strategically planning the company's activities (Table 4).

Table 4

Characteristics of the taxation system

Type of tax	Simplified system	General system
VAT (subject to registration) Annual income is over 1 million UAH VAT payment is mandatory	not applicable	20 %
Income tax	not applicable	18 % of net profit
Single tax	fixed rate	not applicable
Personal income tax (PIT)	18 %	18 %
Single social contribution (SSC)	22 % of the minimum wage “for yourself” 22 % (salary accrual)	22 % (salary accrual)
Military recruitment	1, 2, 4 groups of single tax payers pay 800 UAH The 3rd group of single tax payers pays 1 % of income The mandatory payment is levied on the basis of paragraph 16 of subsection 10 of the Transitional Provisions of the Tax Code of Ukraine The military levy from the payroll fund in 2025 is 5 %	

Source: [12; 13]

Restaurant establishments can choose a taxation system within the framework provided for by current legislation. If the establishment is registered as an “individual”, then the company can be a sole taxpayer of group II or III (depending on the number of employees and annual income). If an enterprise is a taxpayer of the general system, then, first of all, it pays income tax, VAT, unified social contribution, military levy, land tax, tourist tax (if the latter is established by local authorities) [12]. The information base for building models of tax optimization is the financial, accounting and tax reporting of the enterprise, on the basis of which it is possible to determine effective tools for reducing the tax burden. Let us consider the following methods of tax optimization for enterprises (Table 5).

Table 5

Methods for optimizing VAT and income tax

VAT optimization methods	
Advantages	Problems, comments
Single tax payer – VAT non-payer (transition to group 3 of the simplified system with a rate of 5 % – VAT non-payer)	
The single tax expands the annual income limit that allows you to be a VAT non-payer: under general conditions, this is UAH 1 million, and group 3 of the single tax has a limit of 1,167 minimum wages as of January 1 (for 2025 – UAH 9,336,000)	A VAT defaulter loses potential counterparties who are tax payers and are interested in generating a tax credit
Organizational methods for optimizing income tax	
Advantages	Problems, comments
1. Changing the general taxation system to a simplified one (transition to a single tax – group 3 with rates of 3 % (VAT payer) or 5 % (VAT non-payer))	
The tax rate is lower (3 % or 5 % single tax versus 18 % income tax)	The single tax is paid on income, i.e., expenses are not taken into account. For enterprises with significant expenses, the simplified system is not profitable
2. Changing the organization of the business, its fragmentation	
<i>Use of individual entrepreneurs who pay a single tax – group 2 or group 3</i>	
Part of the business can be conducted through registered individual entrepreneurs, meaning that taxes will be paid less. The single tax for group 3 is 3 % of income (VAT payer) and 5 % of income (VAT non-payer). If group 2 is a single tax payer, the rate is fixed and is 20 % of the minimum wage as of January 1 (in 2025 – UAH 1,600)	Costs are reduced due to the Social Security System, so profits and income tax increase. You can get a fine for concealing employment relationships from the State Labor Service
Splitting a business into several business entities operating under different taxation systems, as well as conducting individual transactions through “one’s own” individual entrepreneurs, is considered a tax optimization tool	
Annual tax limits that provide favorable taxation conditions: 1,167 minimum wages as of January 1 (for 2025 – UAH 9,336,000) – limit for a single tax payer of group 3; up to UAH 1 million for non-registration as a VAT payer	Company expenses are increasing

Source: [13]

Table 6

Tax optimization scenarios for a restaurant business

Income and expense items	Total amount, including taxes, UAH	VAT (20%), UAH	Payment of taxes and fees		Amount for LLC (VAT payer), UAH	VAT (20%), UAH	Amount per individual entrepreneur (group 3) Single tax – 5 % of income (limit for the year 9336 thousand UAH; month 778 thousand UAH)	Tax payment, SSC LTD + 3rd group of individual entrepreneurs
			General taxation system					
REVENUE per month	1 500 000,00	250 000,00			960 000,00	160 000,00	540 000,00	
Kitchen	540 000,00	90 000,00					540 000,00	
Alcohol, tobacco (excise goods)	960 000,00	160 000,00			960 000,00	160 000,00		
DIRECT COSTS	515 000,00	85 833,33			350 000,00	58 333,33	165 000,00	
Purchasing goods	500 000,00	83 333,33			350 000,00	58 333,33	150 000,00	
Transportation costs for delivering goods to the warehouse	15 000,00	2500,00					15 000,00	
GROSS PROFIT/LOSS	985 000,00				610 000,00		375 000,00	
General and administrative expenses	368 000,00	5333,33			318 000,00	5333,33	50 000,00	
Equipment rental	100 000,00				50 000,00		50 000,00	
Line staff salaries	150 000,00				150 000,00			
SSC	33 000,00		33 000,00		33 000,00			33 000,00
Communication services	2000,00	333,33			2000,00	333,33		
Office expenses, transportation, gasoline, security, etc.	30 000,00	5000,00			30 000,00	5000,00		
Bank services	2000,00				2000,00			
PROFIT BEFORE TAXATION	300 000,00				25 000,00		275 000,00	
Income tax 18 %	54 000,00		54 000,00		4500,00			4500,00
Single tax 5 %							27 000,00	27 000,00
VAT 20 %		158 833,33	158 833,00			96 334,00		96 334,0
Military levy (3rd group – 1 %)							5400,00	5400,00
SSC “for yourself”							1760,00	1760,00
Total per month (taxes + SSC)			245 833,00					
Total per month (LLC + 3rd group of individual entrepreneurs)					4500,00	96 334,00	34 160,00	167 994,00

Tax optimization for wages is achieved as savings at the expense of the Social Security Tax: the payment of Social Security Tax of 22 % of the payroll is transferred to individual entrepreneurs, who pay it from the minimum wage. Also, optimizing the activities of individual entrepreneurs includes attracting highly qualified personnel (marketers, IT specialists, accountants, designers) as individual entrepreneurs (group 3, 5 % of income) instead of employees.

The proposed alternative taxation model demonstrates certain benefits: instead of the traditional scheme, which involves the employee paying 18 % personal income tax (PIT) and 5 % military levy, as well as the employer paying 22 % social security contribution, a simplified mechanism is applied: payment of a single tax at a rate of 5 % of total income and a minimum social security contribution of 22 % of the minimum wage. This approach allows for a significant reduction in the fiscal burden on business, while remaining within the current institutional and legal framework.

Taking into account the above information, let's consider the features of optimizing taxation in the restaurant business, which allows you to effectively manage the tax burden, taking into account available financial resources. The situation is modeled taking into account the separation of functions between different business entities to maximize the benefits of a simplified taxation system.

Effective application of various methods of optimizing VAT and income tax requires constant monitoring of changes in tax legislation and timely adjustment of the strategy for optimizing the taxation of the restaurant business, taking into account its financial capabilities and market situation. In wartime conditions, scenario planning is critically important, namely the calculation of the optimal work scheme in a restaurant, taking into account revenue from product sales, expenses, and the fact that only a subject on the general taxation system has the right to sell excisable goods (alcohol, tobacco). The calculated level of tax burden demonstrates the presence of significant differences between enterprises operating in different organizational and legal forms and using different taxation regimes (Table 6).

Under the general taxation system, the enterprise will pay income tax of UAH 54,000 and VAT of UAH 158,833. If the company is in the form of an LLC (general VAT system) and an individual entrepreneur (group 3), then the income and VAT will be significantly lower, UAH 4,500 and UAH 96,334, respectively.

After the implementation of optimization measures, a thorough analysis of the results obtained is carried out, determining the effectiveness of the methods used and making adjustments if necessary, on the basis of which alternative scenarios of tax activity are formed, which are evaluated by the level of tax burden with the subsequent selection of the most appropriate option in accordance with the optimization plan (Table 7).

Table 7

Recommendations for increasing the efficiency of tax levers

List of key recommendations
Assess the company's current financial condition and identify tax risks
Analyze opportunities to reduce the tax burden by optimizing tax obligations and using tax benefits
To study innovative tax instruments and determine their applicability
Consider opportunities to participate in government programs and initiatives and take advantage of their benefits
Organize training and education for staff to understand and effectively use tax opportunities
Maintain internal accounting and documentation in accordance with tax law requirements to avoid misunderstandings with tax authorities
Cooperate with professional tax consultants to receive qualified assistance and advice in the field of tax optimization
Monitor changes in tax legislation and timely adapt the company's tax strategy to new requirements and conditions
Develop an individual taxation strategy that takes into account the specifics of the industry and ensures optimal use of tax levers
Cooperate with audit firms to conduct tax audits and identify opportunities to improve tax efficiency

Source: [7; 8; 10]

Conclusions. In summary, the main recommendations for achieving the goal of our research are as follows. Tax optimization is an important tool for reducing the tax burden, which ensures effective management of enterprise finances in the face of constant changes in the economic and legal environment. The use of legally permitted methods, planning, comprehensive analysis of financial indicators, and systematic monitoring of changes in the regulatory framework form the basis for stable operation and sustainable business development. Further scientific exploration should focus on tax planning, which involves strategic forecasting and careful organization of a business's tax obligations using mathematical methods.

Bibliography:

1. Андрієнко К., Артюх О. Проблемні аспекти сучасної податкової системи України. *International Science Journal of Management, Economics & Finance*. Vol. 2, No. 4. 2023. P. 1–10.
2. Левицька І. В., Климчук А. О., Захарова С. Г. Оподаткування підприємств в контексті повоєнного стимулювання економічного розвитку України. *Академічний огляд*. 2023. № 2. Вип. 59. С. 143–154.
3. Гайдук Х., Артюх О. Податкова мінімізація: сучасний стан та шляхи вирішення. *International Science Journal of Management, Economics & Finance*. Vol. 2, No. 4. 2023. P. 21–26.
4. Матвійчук Н., Теслиук С., Плоскіна А., Писарчук Д. Реформування спрощеної системи оподаткування в умовах воєнного стану. *Економічний часопис Волинського національного університету імені Лесі Українки*. 2023. Т. 2. № 34. С. 29–36.
5. Шарманська, В., Заверуха, Т. Оптимізація оподаткування підприємств в сучасних економічних умовах. *Економіка та суспільство*. 2023. Вип. 58. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-58-70>
6. Оришин Т. М. Оптимізація податкового навантаження підприємства: теоретичний та методичний аспекти. *Економіка та держава*. 2019. № 4. С. 58–62.
7. Чернюк, Т. В. Системи оподаткування в умовах війни: правовий та фінансовий аспекти. *Вісник студентського наукового товариства Донецького національного університету імені Василя Стуса*. Вип. 14. Т. 2. 2022. С. 258–262.
8. Осадча О. О. Податкове планування та податкова оптимізація в системі управління підприємством. *Наукові записки Національного університету «Острозька академія». Серія «Економіка»*. 2019. № 14(42). С. 125–130.
9. Стеблюк Н. Ф., Філін А. О. Вплив податкового навантаження на діяльність підприємств. *Молодий вчений*. 2015. № 8 (23). Ч.1. С. 80–86.
10. Ярмоліцька О. В. Вплив особливостей обліку і оподаткування на управління діяльністю закладів (підприємств) ресторанного господарства. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Економіка і управління»*. 2023. Вип. 54. С. 87–95.
11. Budko O., Volosova N., Stebliuk N. Economic and mathematical methods and models in economic analysis and auditing : monograph. Kamianske : DSTU, 2024. 167 p.
12. Податковий кодекс України (зі змінами і доповненнями). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text>
13. Онищенко В. Оптимізація податків. *Головбух*. 2024. URL: <https://buhplatforma.com.ua/article/17274-optimizatsiya-podatkov-2024>

References:

1. Andriienko, K., & Artiukh, O. (2023). Problemni aspekty suchasnoi podatkovoi systemy Ukrainy [Problematic aspects of the modern tax system of Ukraine]. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal z menedzhmentu, ekonomiky ta finansiv*, 2 (4), 1–10.
2. Levytska, I. V., Klymchuk, A. O., & Zakharova, S. H. (2023). Opodatkuvannia pidpriemstv v konteksti povoiennoho stymuliuvannia ekonomichnoho rozvytku Ukrainy [Taxation of enterprises in the context of post-war stimulation of economic development of Ukraine]. *Akademichnyi ohliad*, 2 (59), 143–154.
3. Haiduk, K., & Artiukh, O. (2023). Podatkova minimizatsiia: suchasnyi stan ta shliakhy yii vyrishennia [Tax minimization: current state and solutions]. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal menedzhmentu, ekonomiky ta finansiv*, 2 (4), 21–26.
4. Matviichuk, N. M., Tesliuk, S. A., Ploskina, A., & Pysarchuk, D. (2023). Reformuvannia sproshchenoi systemy opodatku-vannia v umovakh voiennoho stanu [Reforming the simplified taxation system under martial law]. *Ekonomichnyi chasopys Volynskoho natsionalnoho universytetu imeni Lesi Ukrainky*, 2, 29–36.
5. Sharmanska, V., & Zaverukha, T. (2023). Optymizatsiia opodatkuvannia pidpriemstv v suchasnykh ekonomichnykh umovakh [Optimization of enterprise taxation in modern economic conditions]. *Ekonomika ta suspilstvo*, 58. Retrieved from: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-58-70>
6. Oryshchyn, T. M. (2019). Optymizatsiia podatkovoho navantazhennia pidpriemstva: teoretychni ta metodychni aspekty [Optimization of the enterprise tax burden: theoretical and methodological aspects]. *Ekonomika ta derzhava*, 4, 58–62.
7. Cherniuk, T. V. (2022). Systemy opodatkuvannia v umovakh viiny: pravovyi ta finansovyi aspekty [Taxation systems in wartime conditions: legal and financial aspects]. *Visnyk studentskoho naukovohto tovarystva DonNU imeni Vasylia Stusa*, 2(14), 258–262.
8. Osadcha, O. O. (2019). Podatkove planuvannia ta podatkovia optymizatsiia v systemi upravlinnia pidpriemstvom [Tax planning and tax optimization in the enterprise management system]. *Naukovi zapysky Natsionalnoho universytetu "Ostrozka akademiia"*. Serii «Ekonomika», 14(42), 125–130.
9. Stebliuk, N. F., & Filin, A. O. (2015). Vplyv podatkovoho navantazhennia na diialnist pidpriemstv [The impact of the tax burden on the activities of enterprises]. *Molodyi vchenyi*, 8 (23), 1, 80–86.

10. Iarmolitska, O. V. (2023). Vplyv osoblyvostei obliku i opodatkovannia na upravlinnia diialnistiu zakladiv (pidpriemstv) restorannoho hospodarstva [The impact of accounting and taxation features on the management of the activities of establishments (enterprises) of the restaurant industry]: Zbirnyk naukovykh prats DYIT. *Ekonomika i upravlinnia*, 54, 87–95.

11. Budko, O., Volosova, N., & Stebliuk, N. (2024). Economic and mathematical methods and models in economic analysis and auditing : monograph. Kamianske : DSTU.

12. Podatkovi kodeks Ukrainy (zi zminamy i dopovnenniamy) [ax Code of Ukraine (with amendments and supplements)]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text>

13. Onishchenko, V. (2024). Optyimizatsiia podatkiv. Holovbukh [Tax Optimization. Chief Accountant.]. Retrieved from: <https://buhplatforma.com.ua/article/17274-optimizatsiya-podatkov-2024>

Дата першого надходження статті до видання: 01.12.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.073.235:656.212:519.85

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2026-1-71.29>

Огліх В. В., кандидат фізико-математичних наук, доцент,
вчений секретар інституту Інституту транспортних систем
та технологій Національної академії наук України
ORCID: 0000-0003-3193-7931

Шаповалов О. В., кандидат технічних наук, старший науковий
співробітник, доцент кафедри транспортних технологій
та міжнародної логістики Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-8788-3771

Кузьменко А. І., кандидат технічних наук, доцент,
завідувачка кафедри транспортних технологій та міжнародної
логістики Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-7278-3647

Лісунова В. В., завідувачка науково-організаційного відділу
Інституту транспортних систем та технологій
Національної академії наук України
ORCID: 0000-0003-1634-2091

МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ У ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ВІДПОВІДНОСТЕЙ

У статті розглянуто проблематику моделювання взаємозв'язків у транспортних системах із застосуванням методу аналізу відповідностей (Correspondence Analysis, CA). Актуальність дослідження зумовлена трансформаціями транспортної мережі України як під впливом глобальної цифровізації, так і під впливом військової агресії. Існує нагальна потреба у нових підходах до стратегічного й тактичного керування логістичними процесами. Особливу увагу приділено інтермодальним перевезенням як ключовому чиннику сталого розвитку транспортної системи. У роботі систематизовано чинники, що впливають на рівень інтермодальних перевезень, зокрема державну політику, інфраструктурну забезпеченість, функціонування терміналів, цінові аспекти та інновації в галузі ІКТ. На основі аналізу сучасних наукових джерел окреслено тенденції переходу від фрагментарних досліджень до комплексного сценарного планування та використання інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Запропоновано алгоритм застосування методу аналізу відповідностей для сегментації ринку інтермодальних перевезень, що включає формалізацію даних у вигляді контингентних матриць, нормалізацію та побудову профілів, визначення χ^2 -відстаней, сингулярний розклад та візуалізацію результатів у низьковимірному просторі. Показано, що CA дозволяє виявляти приховані закономірності у великих масивах категоріальних даних, ідентифікувати кластери клієнтів та формувати диференційовані тарифні й сервісні стратегії. Практична цінність дослідження полягає у створенні інструментарію для оптимізації процесів прийняття рішень у сфері інтермодальних логістичних операцій, що може бути використаний як приватними операторами, так і державними інституціями. Перспективи подальших досліджень пов'язані з інтеграцією методів прогнозу аналітики та штучного інтелекту для моделювання складних мережевих систем у режимі реального часу.

Ключові слова: транспортні системи, інтермодальні перевезення, цифрова трансформація, аналіз даних, аналіз відповідностей, інтелектуальні системи підтримки рішень

Ohlikh V. V., Shapovalov A. V., Kuzmenko A. I., Lisunova V. V. Modeling interrelations in transport systems using the method of correspondence analysis

The article explores the modeling of interrelations within transport systems through the application of Correspondence Analysis (CA), a statistical method particularly effective for categorical and mixed discrete data. The relevance of this research is shaped by the profound transformation of Ukraine's transport network under the dual pressures of military aggression and



© В. В. Огліх, О. В. Шаповалов, А. І. Кузьменко, В. В. Лісунова, 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

global digitalization. These challenges necessitate innovative approaches to strategic and tactical decision-making in logistics, especially in the domain of intermodal transportation, which is increasingly recognized as a cornerstone of sustainable development. Intermodal transport enables the integration of rail, road, maritime, and inland waterways, thereby reducing costs, saving time, and minimizing environmental impact. The study systematizes the diverse factors influencing intermodal transport performance, including state policy support, infrastructure maturity, terminal network development, pricing mechanisms, and the role of ICT-driven innovations. A comprehensive review of contemporary literature highlights the shift from fragmented analyses toward systemic approaches that incorporate scenario planning, multi-criteria evaluation, and intelligent decision support systems capable of processing large-scale datasets in real time.

The methodological contribution of the paper lies in the proposed algorithm for applying CA to the segmentation of the intermodal transport market. This algorithm involves the construction of contingency matrices, normalization and profile building, χ^2 -distance calculations, singular value decomposition, and visualization of results in low-dimensional Euclidean space. Such an approach allows researchers and practitioners to uncover hidden associations, identify clusters of clients with similar modal preferences, and design differentiated tariff and service strategies tailored to specific market segments. Unlike traditional numerical methods, CA provides a more nuanced representation of categorical relationships, enabling the detection of structural patterns that are often overlooked in complex transport systems.

The practical significance of the study is twofold. First, it offers a robust analytical tool for private stakeholders such as logistics providers, terminal operators, and intermodal carriers, who require accurate market segmentation to optimize service delivery. Second, it provides state institutions and policymakers with evidence-based insights for infrastructure planning, regulatory frameworks, and sustainable transport strategies. By bridging methodological rigor with applied relevance, the research contributes to the modernization of transport systems and supports Ukraine's integration into global logistics networks.

Key words: transport systems, intermodal transportation, digital transformation, data analytics, correspondence analysis, intelligent decision support systems.

Постановка проблеми. Ухвалення стратегічних та тактичних рішень стосовно вдосконалення транспортної мережі України набуває надзвичайної важливості через трансформації, спричинені військовою агресією з боку росії та глобальним зсувом світової економіки у фазу інформаційної ери. Інтенсивне розширення цифрової економіки докорінно змінило транспортні системи, перетворивши їх на платформи, орієнтовані на інформацію, здатні акумулювати колосальні обсяги даних про рух вантажів та пасажирів, траєкторії руху, швидкість доставлення, а також особливості поведінки споживачів послуг [1, 2].

Для сталого розвитку логістичної діяльності вирішальну роль відіграє саме розвиток систем, що забезпечують інтермодальні перевезення. Наукові розробки у цій сфері демонструють конкретні шляхи для оптимізації системи та підвищення частки використання інтермодальних перевезень у загальному логістичному ланцюжку. Це, своєю чергою, сприяє мінімізації негативного впливу операційних витрат логістики на стійкість загального розвитку.

Однак, належна організація подібних перевезень ускладнюється необхідністю брати до уваги широкий спектр чинників (рис. 1), зокрема:

- ступінь підтримки державою політики щодо інтермодальних перевезень;
- розвиненість логістичної інфраструктури як такої;
- наявність мережі транспортних терміналів, а також функції різних типів ІТ-терміналів;
- структура самої транспортної мережі, включаючи визначення маршрутів для інтермодальних перевезень;
- ступінь залучення різномірних видів транспорту;
- цінові аспекти самих перевезень;
- формування мережі доступних інтермодальних послуг;
- специфіка здійснення операцій, пов'язаних із транспортуванням вантажів;
- ступінь трансформації товарних потоків
- інновації в галузі інформаційно-комп'ютерних технологій.

Для підвищення стійкості логістичних систем необхідне інтенсивне планування та розвиток систем інтермодального транспортування [3]. Ефективне управління логістичними процесами, оптимізація транспортних потоків і прийняття обґрунтованих управлінських рішень у режимі реального часу вимагають дослідження взаємозв'язків між структурними компонентами транспортної системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інтермодальні перевезення дедалі більше розглядаються як ключовий елемент сталого розвитку транспортної системи. Основна ідея інтермодальних перевезень полягає у використанні альтернативних видів транспорту (залізничний, внутрішній водний та морський) для підвищення ефективності логістичної системи внаслідок зниження витрат та економії часу [4]. Крім того, завдяки використанню ІТ зменшується негативний вплив логістичної діяльності на навколишнє середовище [5].

Огляд сучасних наукових джерел з проблематики інтермодальних перевезень засвідчує посилення наукової уваги до питань сталого розвитку, процесів цифровізації та застосування багатокритеріальних методів підтримки прийняття управлінських рішень. У дослідженнях особливий акцент зроблено на використанні сценарного планування та інтелектуальних систем підтримки, що забезпечують обробку значних масивів даних за допомогою сучасних комп'ютерних технологій.

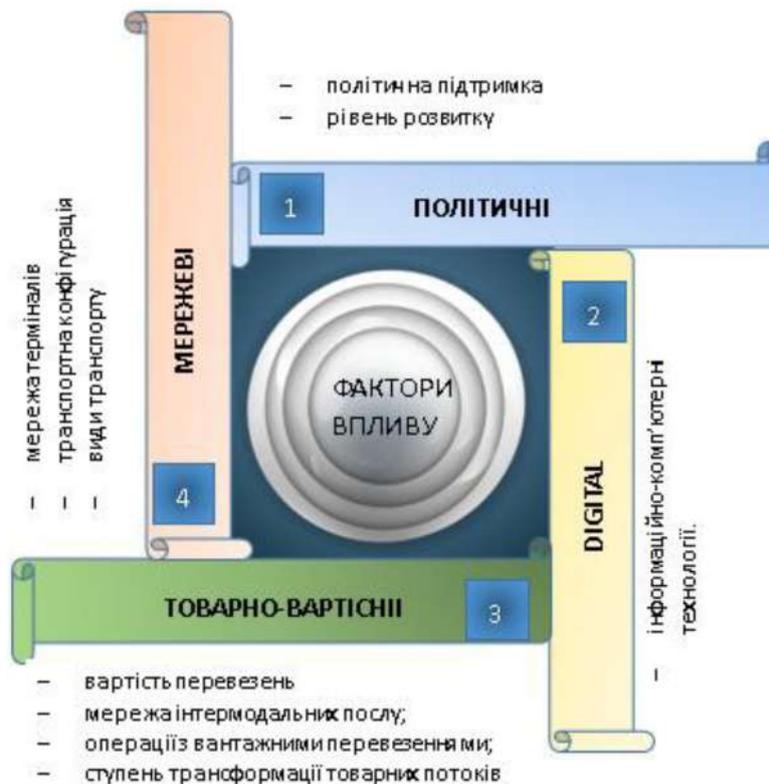


Рис. 1. Фактори впливу на рівень інтермодальних перевезень

Аналіз літератури демонструє перехід від фрагментарних досліджень до системного підходу, орієнтованого на комплексне вивчення таких аспектів:

- **оптимізація логістичних ланцюгів** через інтеграцію різних видів транспорту (залізничного, автомобільного, морського), для підвищення ефективності логістичної системи шляхом зниження витрат та економії часу [4];
- **зменшення негативного впливу** логістичної діяльності **на навколишнє середовище** [5], зменшення вуглецевого сліду шляхом зменшення частки автомобільних перевезень;
- **цифрова трансформація** та автоматизація процесів планування та управління;
- **інновації** в галузі ІКТ;
- **data analyze** (обмежена доступність даних через фрагментованість транспортних систем на тлі їх величезного обсягу та наявності як кількісної, так і якісної інформації);
- **сценарне планування** [6];
- **багатокритеріальна оцінка**, яка ускладнює прийняття стратегічних і тактичних рішень;
- **інтелектуальні Decision Support Systems (DSS)** [7];
- **розробка моделей підтримки прийняття рішень** для підтримки стратегічних рішень у сфері інтермодальних перевезень в складних мережевих системах, експертні методи, нечітка логіка, та AI;
- **масштаб мережі**, що ускладнює прийняття рішень та моделювання.

Стаття [6] заповнює прогалину в дослідженнях, що стосуються комплексного сценарного планування розвитку інтермодальних перевезень, зокрема у Південно-Східній Європі. Визначено шість сценаріїв розвитку, які відрізняються: конфігурацією мережі; видами транспорту, рівнем розвитку інфраструктури; роллю терміналів; ступенем трансформації товарних потоків. Враховано інтереси різних груп зацікавлених сторін (уряд, бізнес, логістичні оператори, громадськість) та дванадцять критеріїв оцінки.

Результати аналізу свідчать, що дослідницьким програмам у сфері підтримки прийняття рішень бракує досліджень, які б визначали інтелектуальні DSS (Decision Support Systems), моделювання сценаріїв та симуляцій, data analyze в контексті інтеграції реального часу та прогнозу аналітики на різних рівнях) [7, 8].

Мета статті. Розвиток цифрових технологій спричинив стрімке наростання обсягів даних у галузі транспорту. Для формування як стратегічних, так і тактичних рішень критично важливою є інструментальна спроможність виявляти значущі зв'язки між формами перевезення, класами замовників-вантажовідправників, типами рухомого складу, зонами географічного обслуговування, номенклатурою вантажів, та іншими параметрами.

Цей підхід набуває особливої ваги при дослідженні інтермодальних перевезень, де взаємодія між різними видами транспорту потребує точного інформаційного забезпечення. У цьому контексті, застосування

математичних методів моделювання виступає ключовим засобом для вивчення взаємозалежностей між компонентами транспортної системи та моделями поведінки клієнтів.

Актуальність дослідження обумовлена складністю та багатогранністю поставленого завдання, його практичною цінністю, а також недостатнім рівнем наявних розробок у цій сфері.

Метою дослідження є формування певного набору інструментів, який сприятиме отриманню необхідної інформації для оптимізації процесів прийняття рішень саме у сфері інтермодальних логістичних операцій.

Виклад основного матеріалу. Розроблені моделі мають бути спрямовані як на приватних учасників ринку, серед яких оператори мереж, логістичні провайдери, власники терміналів чи спеціалізовані інтермодальні оператори, так і на державні установи, включно з органами формування політики у галузі транспорту та адміністраціями портів. Такий широкий спектр користувачів передбачає застосування математичного інструментарію математичного апарату, що варіюється за рівнем своєї складності.

У завданнях, де використовуються категоріальні або змішані дискретні дані, метод аналізу відповідностей (*Correspondence Analysis*, CA) стає природним вибором. Його ключова перевага полягає у здатності відображати структуру асоціацій у низьковимірному просторі без необхідності штучного перетворення категоріальних характеристик у числові. Це спрощує виявлення прихованих закономірностей у великих масивах категоріальних даних. На відміну від методу головних компонент, який орієнтований здебільшого на числові узагальнення багатовимірної інформації, аналіз відповідностей є більш ефективним під час роботи з категоріальними даними. Він дозволяє точніше описати структуру взаємовідносин у транспортних системах без спрощення багатовимірності. Результати цього методу презентуються у низьковимірному евклідовому просторі, де просторове розташування точок відображає рівень асоціацій між відповідними категоріями або їх відсутність.

Методологія. Алгоритм Correspondence Analysis для задачі сегментації ринку інтермодальних перевезень складається з таких кроків.

Крок 1. Постановка задачі. Завдання полягає в аналізі інтермодальних ланцюгів, виявленні, класів вантажовідправників, що формують попит на комбіновані маршрути, виявленні вузлів, де доцільно формувати термінально-складську інфраструктуру та мультимодальні термінали. Значущим є те, що на підставі результатів CA виявляється сегментація ринку, формуються сегменти клієнтів з подібними профілями вибору модальностей; це дозволяє для кожного сегмента розробити диференційовану тарифну і сервісну стратегію.

Крок 2. Формалізація вхідних даних. Вхідні дані представлені контингентною матрицею S розмірності $n \times k$: $S = [s_{ij}]$, $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, k$, де рядки i відповідають типам перевезень (автомобільні, залізничні, морські, авіаційні, комбіновані тощо), а стовпці j – класам користувачів або суб'єктам інфраструктури (виробники, логістичні оператори, роздрібні мережі, експедитори, кінцеві споживачі тощо).

Її елемент s_{ij} містить абсолютну частоту або зважене значення вибору виду перевезення i представниками класу j за обраний період.

Завдання полягає в аналізі інтермодальних ланцюгів, виявленні, класів вантажовідправників, що формують попит на комбіновані маршрути, виявленні вузлів, де доцільно формувати термінально-складську інфраструктуру та мультимодальні термінали.

Значущим є те, що на підставі результатів CA виявляється сегментація ринку, формуються сегменти клієнтів з подібними профілями вибору модальностей – це дозволяє для кожного сегмента розробити диференційовану тарифну і сервісну стратегію.

Крок 3. Нормалізація та побудова профілів

Визначення загальної суми елементів $Stot$ та побудова матриці ймовірностей (відносних частот) $P = \{p_{ij}\}$, $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, k$:

$$Stot = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k s_{ij}, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, k;$$

$$\forall i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, k : p_{ij} = s_{ij} / Stot.$$

Крок 4. Центрування даних (Маргінальні профілі):

На даному кроці, який базується на гіпотезі про незалежність, визначаються відмінності між спостережуваними профілями рядків/стовпців та їхніми очікуваними (середніми) значеннями.

Визначаємо вектори $r1 = (r1_1, r1_2, \dots, r1_n)$; $r2 = (r2_1, r2_2, \dots, r2_k)$ – рядкові та стовпчикові маргінали.

$$r1_i = \sum_{j=1}^k p_{ij}, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, k;$$

$$r2_j = \sum_{i=1}^n p_{ij}, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, k.$$

Тоді рядкові та стовпчикові профілі (нормалізовані по сумі рядка) мають вигляд:

$$pr_i = \left(\frac{p_{i1}}{r1_i}, \dots, \frac{p_{ik}}{r1_k} \right), \quad pr_j = \left(\frac{p_{1j}}{r2_j}, \dots, \frac{p_{nj}}{r2_j} \right), \quad i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, k,$$

очікувані частоти $E = \{e_{ij}\}$, $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, k$; $e_{ij} = r1_i \times r2_j$.

Для аналізу таблиць спряженості обрано χ^2 -відстань, цей вибір є природним, оскільки враховує **порційні відмінності**, а не абсолютні частоти. Вона дозволяє порівнювати профілі незалежно від того, наскільки великі або малі загальні суми рядків чи стовпців. Ця метрика лежить в основі **аналізу відповідей (СА)**, тому що забезпечує відображення в узгодженому геометричному просторі.

Визначення відстані X^2 між рядками та стовпцями:

Вираз для $d^2(i, i')$ слугує для зіставлення профілів рядків – а саме, умовних розподілів категорій j у межах рядків i та i' .

$$d^2(i, i') = \sum_{j=1}^k \frac{1}{r2_j} \left(\frac{p_{ij}}{r1_i} - \frac{p_{i'j}}{r1_{i'}} \right)^2,$$

$$d^2(j, j') = \sum_{i=1}^n \frac{1}{r1_i} \left(\frac{p_{ij}}{r2_j} - \frac{p_{i'j}}{r2_{j'}} \right)^2,$$

$d^2(j, j')$ дає можливість порівняти стовпчикові профілі – тобто умовні розподіли категорій i у стовпцях j та j' .

Коли величини $d^2(i, i')$ та $d^2(j, j')$ незначні, це свідчить про те, що розглядувані рядки/стовпці демонструють схожі профілі; іншими словами, вони розподіляють вагову частку по колонкам (стовпцях) аналогічним чином. Натомість велике значення вказує на суттєві розбіжності у структурі частотних розподілів цих рядків.

Вагові коефіцієнти $1/r1_i$ та $1/r2_j$ забезпечують коректне порівняння категоріальних розподілів, нівелюють істотні розбіжності загальних частот. Вони надають більшої значущості тим колонкам./рядкам, які мають менші загальні частоти. Коефіцієнти застосовується задля того, аби категорії, які не нечасто зустрічаються, брали активну участь у формуванні оцінки відмінностей, а не залишалися непоміченими на тлі більш чисельних (домінантних) показників.

Крок 5. Сингулярний розклад

Крок передбачає:

– формування матриці відхилення A , яка визначається як

$$A = D_{r1}^{-1/2} (P - r1 \cdot r2^T) D_{r2}^{-1/2},$$

де $P = \{p_{ij}\}$ – матриця спільних частот, $D_{r1} = \text{diag}(r1)$ – діагональна матриця сум рядків, $D_{r2} = \text{diag}(r2)$ – діагональна матриця сум стовпців;

– застосування сингулярного розкладу

$$A = U \Sigma V^T,$$

де U і V – ортонормовані матриці лівих та правих сингулярних векторів; $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots)$ – діагональна матриця сингулярних значень? σ_k^2 відповідають частці загальної змінності (інерції), поясненої k -ю компонентою.

Матриця відхилення фактичних частот від очікуваних ($P - r1 \cdot r2^T$) відображає наскільки наявні залежності відхиляються від моделі статистичної незалежності. А множники $D_{r1}^{-1/2}$, $D_{r2}^{-1/2}$ забезпечують інтерпретацію в евклідовому просторі, усувають нерівність масштабів між рядками та стовпцями.

Крок 6. Візуалізація.

Координати рядків та стовпців, які описують геометричну структуру таблиці спряженості в низьковимірному просторі визначаються в ортонормованому просторі:

$$F = D_{r1}^{-1/2} U \Sigma,$$

$$G = D_{r2}^{-1/2} V \Sigma.$$

Ці координати переносять об'єкти (рядки та стовпці) до єдиного простору чинників, тобто до простору, у якому квадрат евклідової відстані між векторами набуває змісту χ^2 -відстані; а вектори вказують на ключові тенденції у взаємозв'язках. Зокрема близькість позицій двох точок відображає схожість їхніх характеристик, а вектори, спрямовані протилежно, свідчать про протиставлення категорій. Відстань конкретної точки від початку координат характеризує значущість відповідної категорії.

Зазвичай найбільшу частку інерції пояснюють перші дві компоненти, що створює можливість для візуалізації на двовимірному графіку, це так звана 2D-проекція. Виникає перспектива ідентифікації кластерів

рядків і стовпців, оцінки напрямків найсильніших асоціацій, виявлення симетричності структури взаємозв'язків.

Висновки. Як приклад застосування запропонованого підходу можна навести аналіз даних, щодо використання того чи іншого типу транспорту (залізничний, автомобільний, водний (морський, річковий), повітряний) різними класами групи клієнтів, а саме: виробники, роздрібні торговці, логістичні оператори, агенти електронної комерції. В такому випадку в контингентній матриці рядки відповідають видам транспорту, а стовпці групам клієнтів.

Направленість на інтермодальність передбачає виявлення потреб вантажовідправників, які формують попит на комбіновані маршрути. Застосування запропонованого підходу дасть уявлення про вузли, де доцільно проводити інвестиції у термінально-складську інфраструктуру та мультимодальні термінали, які поєднання переважають і які саме послуги необхідні і якою мірою. Використання методу аналізу відповідностей, яке створює чисельно-візуальну проєкцію географічних зон і модальностей дає можливість визначити пріоритети інвестицій у вузли з високою очікуваною інтенсивністю змішаних вантажопотоків.

Ще одне застосування лежить в царині ефективної тарифної політики, якої доцільно дотримуватися вантажоперевізникам та логістичним операторам. За результатами Correspondence Analysis формуються диференційована тарифна і сервісна стратегія, орієнтована на сегменти клієнтів з подібними профілями. на підставі вибору модальностей кожним сегментом споживачів послуг.

Вкрай важливим є те, що метод легко імплементується в діяльність економічних суб'єктів різного рівня. Найявна потреба перегляду попередніх рішень через зміну ситуації на ринку перевезень, викликає необхідність періодичного виконання аналізу відповідностей на послідовних квазірепрезентативних вибірках. Поєднання відносної легкості застосування та інтерпретації результатів дозволяє відстежувати зсуви в уподобаннях користувачів і адаптувати операційну політику.

Список використаних джерел:

1. Огліх В. В., Шаповалов О. В., Разгонов С. А., Леснікова І. Ю.. Управління транспортними системами інтермодальних та мультимодальних перевезень. *Системи та технології*. 2025. 69(1). С. 145–153. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.18>
2. Огліх В. В., Шаповалов О. В., Лісунова В. В. Застосування методу аналізу відповідностей для моделювання взаємозв'язків у транспортній системі. *Проблеми математичного моделювання: матеріали Всеукраїнської науково-методичної конференції 27–28 травня*. 2025. Кам'янське. Україна. ДДТУ. 2025. 108–109. URL: <http://publish.dstu.dp.ua/data/48.pdf>
3. Tadić S., Krstić M., Roso V., Brnjac N. Planning an intermodal terminal for the sustainable transport network. *Sustainability*. 2019. 11(15), 4102. DOI: 10.3390/su11154102
4. Arnold P., Peeters D., Thomas I. Modelling a rail/road intermodal transportation system. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, 2004. 40(3), 255–270. DOI: 10.1016/j.tre.2003.08.005
5. Agamez-Arias A., Moyano-Fuentes J. Intermodal transport in freight distribution: A literature review. *Transp. Rev.* 2017. 37(6), 782–807. DOI: 10.1080/01441647.2017.1297868
6. Tadić S., Kovač M., Krstić M., Roso V. The Selection of Intermodal Transport System Scenarios in the Function of Southeastern Europe Regional Development. *Sustainability*. 2021. 13(10), 5590. DOI: 10.3390/su13105590
7. Caris A., Macharis C., Janssens Gerrit K. Decision support in intermodal transport: A new research agenda. *Computers in Industry*. 2013. 64(2), 105–112. doi: 10.1016/j.compind.2012.12.001
8. Огліх В. В., Шаповалов О. В., Кузьменко А. І., Леснікова І. Ю. Прийняття стратегічних і тактичних рішень у транспортно-логістичній системі. *Системи та технології*. 2023. 63(1). С. 40–46. DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2022.1-63.3>

References:

1. Ohlikh, V. V., Shapovalov, O. V., Razhonov, S. A., & Lesnikova, I. YU. (2025). Upravlinnyya transportnyy systemamy intermodal'nykh ta mul'tymodal'nykh perevezen' [Management of transport systems of intermodal and multimodal transportation]. *Systemy ta tekhnolohiyi*, 69(1) С. 145–153. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.18>
2. Ohlikh, V. V., Shapovalov, O. V., Lisunova, V. V. (2025). Zastosuvannya metodu analizu vidpovidnostey dlya modelyuvannya vzayemozv'yazkiv u transportniy systemi [Application of the method of correspondence analysis for modeling relationships in the transport system]. *Problemy matematychnoho modelyuvannya: materialy Vseukrayins'koyi naukovo-metodychnoyi konferentsiyi*, 108–109. 27-28 travnya, 2025, Kam'yans'ke, Ukrayina. DDTU. Retrieved from: <http://publish.dstu.dp.ua/data/48.pdf>
3. Tadić, S., Krstić, M., Roso, V., Brnjac, N. (2019). Planning an intermodal terminal for the sustainable transport network. *Sustainability*, 11(15), 4102. DOI: 10.3390/su11154102
4. Arnold, P., Peeters, D., Thomas, I. (2004). Modelling a rail/road intermodal transportation system. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, 40(3), 255–270. DOI: 10.1016/j.tre.2003.08.005

-
5. Agamez-Arias, A., Moyano-Fuentes, J. (2017). Intermodal transport in freight distribution: A literature review. *Transp. Rev.*, 37(6), 782–807. DOI: 10.1080/01441647.2017.1297868
 6. Tadić, S., Kovač, M., Krstić, M., Roso, V. (2021). The Selection of Intermodal Transport System Scenarios in the Function of Southeastern Europe Regional Development. *Sustainability*, 13(10), 5590. DOI: 10.3390/su13105590
 7. Caris, A., Macharis, C., Janssens Gerrit, K. (2013). Decision support in intermodal transport: A new research agenda. *Computers in Industry*, 64(2), 105–112 doi: 10.1016/j.compind.2012.12.001
 8. Ohlykh, V. V., Shapovalov, O. V., Kuzmenko, A. I., & Lesnikova, I. Yu. (2023). Pryiniattia stratehichnykh i taktychnykh rishen u transportno-lohistychnii systemi [Making strategic and tactical decisions in the transport and logistics system]. *Systemy ta tekhnologii*. 63(1). С. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2022.1-63.3>

Дата першого надходження статті до видання: 30.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026