

Національний університет  
“Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка”

National University  
“Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”

# СИСТЕМИ управління, навігації та зв'язку

# Control, navigation and communication systems

Випуск 3 (81)

Issue 3 (81)

## Щоквартальне видання

Засноване у 2007 році

У журналі відображені результати наукових досліджень з розробки та удосконалення систем управління, навігації та зв'язку у різних проблемних галузях.

### Засновник і видавець:

Національний університет  
“Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка”

### Телефон:

+38 (050) 302-20-71

### E-mail редколегії:

kuchuk56@ukr.net

### Інформаційний сайт:

<http://journals.nupp.edu.ua/sunz>

## Quarterly

Founded in 2007

Journal represent the research results on the development and improvement of control, navigation and communication systems in various areas

### Founder and publisher:

National University  
“Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”

### Phone:

+38 (050) 302-20-71

### E-mail of the editorial board:

kuchuk56@ukr.net

### Information site:

<http://journals.nupp.edu.ua/sunz>

*За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор*

*Журнал індексується міжнародними наукометричними базами: Index Copernicus (ICV = **85.62**),  
General Impact Factor, Google Scholar, Academic Resource Index, Scientific Indexed Service*

*Затверджений до друку Вченою Радою Національного університету  
“Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка” (протокол від 30 вересня 2025 року № 13).*

*Ідентифікатор медіа R30-04135 згідно з рішенням Національної ради України  
з питань телебачення і радіомовлення від 25.04.2024 № 1416*

*Включений до “Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії” до категорії Б – наказами МОН України від 17.03.2020 № 409 та від 09.02.2021 № 157*

Полтава • 2025

## Редакційна колегія

### **Головний редактор:**

КОСЕНКО Віктор Васильович  
(*д-р техн. наук, проф., Полтава, Україна*).

### **Заступник головного редактора:**

ШЕФЕР Олександр Віталійович  
(*д-р техн. наук, проф., Полтава, Україна*).

### **Члени редакційної колегії:**

ВЕСОЛОВСЬКИЙ Кшиштоф  
(*д-р техн. наук, проф., Польща*);  
ГАВРИЛКО Євген Володимирович  
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);  
ГАШИМОВ Ельшан Гіяс огли  
(*д-р наук, проф., Баку, Азербайджан*);  
ГОПЕЕНКО Вікторс  
(*д-р інжен. наук, проф., Рига, Латвія*);  
КОВАЛЕНКО Андрій Анатолійович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);  
КРАСНОБАЄВ Віктор Анатолійович  
(*д-р техн. наук, проф., Полтава, Україна*);  
КУЧУК Георгій Анатолійович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);  
ЛЕВЧЕНКО Лариса Олексіївна  
(*д-р техн. наук, доц., Київ, Україна*);  
ЛУНТОВСЬКИЙ Андрій Олегович  
(*д-р техн. наук, проф., Німеччина*);  
МОХАММЕД Амін Саліх  
(*д-р наук, доц., Ербіль, Ірак*);  
СЕМЕНОВ Сергій Геннадійович  
(*д-р техн. наук, проф., Краків, Польща*);  
ЧОРНИЙ Олексій Петрович  
(*д-р техн. наук, проф., Кременчук, Україна*);  
ЯНКО Аліна Сергіївна  
(*канд. техн. наук, доц., Полтава, Україна*).

### **Відповідальний секретар:**

ЗАХАРЧЕНКО Руслан Володимирович  
(*канд. техн. наук, доц., Полтава, Україна*).

## Editorial board

### **Editor-in-Chief:**

Viktor KOSENKO  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Poltava, Ukraine*).

### **Associate editor:**

Oleksandr SHEFER  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Poltava, Ukraine*).

### **Editorial board members:**

Krzysztof WESOŁOWSKI  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Poland*);  
Yevhen HAVRILKO  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);  
Elshan Giyas oglu HASHIMOV  
(*Dr. Sc., Prof., Baku, Azerbaijan*);  
Viktors GOPEJENKO  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Riga, Latvia*);  
Andriy KOVALENKO  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);  
Viktor KRASNOBAYEV  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Poltava, Ukraine*);  
Heorhii KUCHUK  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);  
Larysa LEVCHENKO  
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Kyiv, Ukraine*);  
Andryy LUNTOVSKYY  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);  
Amin Salih MOHAMMED  
(*Dr. (Comp. Eng.), Ass. Prof., Erbil, Iraq*);  
Serhii SEMENOV  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Krakow, Poland*);  
Oleksii CHORNYI  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kremenchuk, Ukraine*);  
Alina YANKO  
(*PhD (Tech.), Ass. Prof., Poltava, Ukraine*).

### **Responsible secretary:**

Ruslan ZAKHARCHENKO  
(*PhD (Tech.), Ass. Prof., Poltava, Ukraine*).

# З М І С Т

## АВТОМОБІЛЬНИЙ, РІЧКОВИЙ, МОРСЬКИЙ ТА АВІАЦІЙНИЙ ТРАНСПОРТ

<i>Булгаков М. П., Логінов О. В., Мельник О. М.</i> Багатокритеріальна оцінка стратегій модернізації суден для зменшення викидів CO <sub>2</sub> на базі методу TOPSIS .....	5
<i>Толкаченко Є. А., Коломійцев О. В., Осієвський С. В., Самокіш А. В., Панченко В. І.</i> Пропозиції щодо оцінки площі поверхні літальних апаратів, що відбиває на основі програмних пакетів тривимірного моделювання .....	10

## УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

<i>Нук А., Diachenko V., Illarionov M., Titova Y.</i> Control models for mobile robot parking using distance sensor data .....	21
<i>Дрючко О. Г., Бунякіна Н. В., Боряк Б. Р., Захарченко Р. В., Давиденко Л. П.</i> Термоаналітичний комплекс для охарактеризування й ідентифікації речовин методом диференційно-термічного аналізу та його можливі деякі сфери застосування .....	27
<i>Євтушенко О. С., Заковортний О. Ю.</i> Математична модель коливань рухомого складу на криволінійній ділянці шляху для боргової системи підтримки прийняття рішень .....	33
<i>Єрошенко О. А., Шиленко М. П.</i> Проектування та аналіз підсилювача електрокардіограми для систем цифрової обробки сигналів .....	37
<i>Кльон А. М., Трет'як А. В., Фомін О. С., Ястреба С. П., Бураков А. С.</i> Визначення похибки позиціонування бюджетної чотириколісної робо-платформи з оптичними датчиками руху .....	41
<i>Ларченко Л. В., Ларченко Б. Д., Рожнова Т. Г.</i> Моделі проектування біт-потокowego online-обчислювача ірраціональних функцій .....	47
<i>Хаханова Г. В., Хаханова І. В., Обрізан В. І., Шевченко О. Ю., Кулак Г. К.</i> Синтез дедуктивних формул для логічних примітивів .....	51

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Главчева Ю. М., Главчев М. І.</i> Особливості виявлення академічного плагіату зображень .....	55
<i>Gorbachov V., Fedorov V.</i> Analysis of mathematical models of random graphs .....	59
<i>Горносталь О. А., Челак В. В.</i> Класифікація мережевих атак методами машинного навчання в умовах дисбалансу тренувальних даних .....	64
<i>Datsenko S.</i> Neural architecture comparison for fact verification on fever dataset .....	72
<i>Деркач Т. М., Бойко М. С., Ястреба В. С.</i> Роль дисципліни «введення в спеціальність» у формуванні професійної ідентичності студентів галузі інформаційних технологій .....	76
<i>Diachenko D., Korobeinikov M., Korobeinikov O., Kovalenko A., Kravchenko P.</i> Data processing methods in a corporate network .....	81
<i>Заїка В. В., Чуєв О. В., Морозова О. І., Нікітіна Т. С.</i> Інтелектуальні вебсистеми для автоматизації обробки та моніторингу інформаційних потоків .....	87
<i>Іванюк О. І.</i> Методологія автоматизованої оцінки тематичної спорідненості наукових публікацій на основі семантичного аналізу .....	96
<i>Kapiton A., Franchuk T., Tyshchenko D., Desiatko A., Zakharov R.</i> Requirements for modern processors for secure operation of information systems and networks .....	101
<i>Kuzhel S., Lytvynov A., Pliekhov O.</i> Methods for analyzing software source code .....	106
<i>Кучук Г. А., Лисиця Д. О., Ірха Д. М., Кириленко Д. В.</i> Метод оптимального розташування об'єктів доповненої реальності .....	112
<i>Levchenko D., Podorozhnyak A., Liubchenko N.</i> Tools and methods for explosive objects detection using artificial intelligence and computer vision .....	117
<i>Malokhvii E.</i> Adaptive filtering and dynamic computation offloading for resilient task execution in IIOT .....	122
<i>Остапенко Л. Ю., Харченко В. С.</i> Система для моделювання подолання перешкод і організації комунікацій в небезпечних просторах: структура та експериментальні дослідження .....	128
<i>Сальніков Д. В., Васильченко О. Г., Караман Д. Г.</i> Оптимізація множення квантованих однобітних матриць для великих мовних моделей .....	136
<i>Фесенко Т. Г., Сергеев Д. В., Долгополов О. М., Сергородцев І. Д., Жук М. В.</i> Інформаційні технології для створення музично-ігрових проектів: бібліометричний аналіз .....	142
<i>Худов Г. В., Хиженяк І. А., Сальник О. В., Минко П. С., Андронов В. В.</i> Аналіз підходів до моделювання та архітектурного представлення інформаційної технології обробки зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження .....	151
<i>Шматко О. В., Малишенко Д. О., Волощук О. Б.</i> Інформаційна система для інтелектуальної класифікації клієнтів: архітектура, реалізація та експериментальні дослідження .....	159
<i>Pyrozhenko S., Radchenko V.</i> Methods and algorithms for virtual machine migration .....	167
<i>Andrusenko Yu., Datsenko S.</i> Features of planning movable cloud VoIP service .....	173

**ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА**

<i>Бурдейна Н. Б., Підлісний Я. А.</i> Організаційно-технічні засоби нормалізації рівнів електромагнітних полів наднизької частоти .....	177
<i>Глива В. А., Осадчий Д. Б.</i> Засоби нормалізації рівнів фізичних факторів на електричних підстанціях високої напруги .....	181
<i>Гусев В. М., Зозуля С. В., Левківський Р. М.</i> Засоби підвищення енергоефективності та захисту від впливу фізичних полів у процесі відновлення будівель .....	185

**ЗВ'ЯЗОК, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА**

<i>Аль-Амморі А. Н., Іценко Р. М., Дяченко П. В., Німич І. О.</i> Фізичні механізми створення технічних каналів витоку акустичної інформації .....	189
<i>Глоба Є. Ю., Смірнов В. Р., Нараєвський М. С., Федорченко В. М.</i> Метод виявлення аномалій в корпоративній мережі .....	193
<i>Демченко О. І., Чумаченко С. В.</i> Технології прогресивного корпусування інтегральних мікросхем .....	199
<i>Любченко О. В.</i> Оцінка ефективності передачі даних у атмосферно-оптичній лінії зв'язку на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод лазерного випромінювання .....	203
<i>Rossikhin V., Tarapata Y., Iashchenko O.</i> Methods of data processing and analysis in a corporate network .....	208
<i>Shefer O., Yevdochenko O.</i> Improving the efficiency of the fire code for combating short pulse interference ...	213

<b>АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК</b> .....	218
----------------------------------	-----

**Організації авторів**

Державний торговельно-економічний університет, Київ, Україна  
 Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна  
 Digicode.IT компанія, Полтава, Україна  
 Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна  
 Науково-дослідний інститут Воєнної розвідки, Київ, Україна  
 Національна академія статистики, обліку та аудиту, Київ, Україна  
 Національний аерокосмічний університет «ХАІ», Харків, Україна  
 Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна  
 Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна  
 Національний транспортний університет, Київ, Україна  
 Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна  
 Національний університет харчових технологій, Полтава, Україна  
 Одеський національний морський університет, Одеса, Україна  
 Приазовський державний технічний університет», Дніпро, Україна  
 Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна  
 Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна  
 Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна  
 Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна  
 Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна  
 Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна  
 Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Authors affiliation**

State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine  
 State University "Kyiv Aviation Institute," Kyiv, Ukraine  
 Digicode.IT company, Poltava, Ukraine  
 Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine  
 Defence Intelligence Research Institute, Kyiv, Ukraine  
 National Academy of Statistics, Accounting and Audit, Kyiv, Ukraine  
 National Aerospace University "KHAІ", Kharkiv, Ukraine  
 National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute," Kyiv, Ukraine  
 National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine  
 National Transport University, Kyiv, Ukraine  
 National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine  
 National University of Food Technologies, Poltava, Ukraine  
 Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine  
 Pryazovskyi State Technical University", Dnipro, Ukraine  
 Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine  
 Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine  
 V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine  
 Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine  
 Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine  
 Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine  
 Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

# Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 656.61:330.322:504.05

doi: 10.26906/SUNZ.2025.3.5-9

М. П. Булгаков, О. В. Логінов, О. М. Мельник

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

## БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОЦІНКА СТРАТЕГІЙ МОДЕРНІЗАЦІЇ СУДЕН ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ CO<sub>2</sub> НА БАЗІ МЕТОДУ TOPSIS

**Анотація.** **Актуальність.** У контексті реалізації стратегії декарбонізації морського транспорту, актуальним постає завдання вибору оптимальної стратегії модернізації судна, яка забезпечить зменшення викидів CO<sub>2</sub> при збереженні економічної доцільності та технічної здійсненності впровадження. З огляду на різноманіття альтернатив, що відрізняються за вартістю, строком окупності, екологічним ефектом та ризиком, виникає потреба у комплексному методі прийняття рішень. **Об'єкт дослідження:** багатокритеріальна модель оцінювання стратегій модернізації суден. **Мета:** застосування методу TOPSIS для визначення найефективнішої альтернативи технічної модернізації судна з урахуванням економічних, екологічних та інженерних факторів. **Результати.** У роботі проаналізовано п'ять стратегій модернізації суден. За п'ятьма критеріями розраховано інтегральний показник ефективності. Результати аналізу демонструють, що стратегія slow steaming має найбільш збалансований профіль. **Висновки.** Модель TOPSIS виявилась ефективною для ранжування альтернатив модернізації з урахуванням множинних критеріїв і може бути використана для обґрунтованого прийняття рішень у сфері управління проектами сталого розвитку морського транспорту.

**Ключові слова:** морський транспорт, модернізація судна; викиди CO<sub>2</sub>; стратегія slow steaming; багатокритеріальна оцінка; енергоефективність; захист середовища, сталий розвиток; екологічна безпека; морський транспорт; проектне управління.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Сучасні судовласники стикаються з необхідністю вибору між декількома сценаріями модернізації, кожен з яких має власні переваги й недоліки з точки зору вартості, строку окупності, ефективності скорочення викидів та технічної складності.

Ускладнення прийняття рішень зумовлене як регуляторною невизначеністю, так і обмеженим ресурсом підприємств.

Відсутність прозорої системи порівняння альтернатив здебільшого уповільнює екологічну трансформацію морського транспорту, що зумовлює необхідність розроблення кількісних моделей, які дозволяють об'єктивно ранжувати стратегії модернізації за сукупністю ключових критеріїв.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних дослідженнях спостерігається активне впровадження багатокритеріальних методів прийняття рішень, таких як TOPSIS, ANFIS та їх гібридних комбінацій з штучними нейронними мережами та алгоритмами оптимізації, для вирішення задач енергетичної ефективності, екологічної безпеки та експлуатаційного ризику транспортних систем [1–7].

Значна увага приділяється використанню таких підходів для оптимізації сумішей палива, зменшення викидів та підвищення коефіцієнтів ефективності двигунів внутрішнього згоряння.

Окремі дослідження [8,–11] фокусуються на стратегічному плануванні переходу до циркулярної економіки та декарбонізації енергосистем, з урахуванням міжнародної політики регулювання викидів.

У галузі морських перевезень виокремлюються огляди з акцентом на методах оцінки ризику у морському транспорті [12], побудову стійких енергетичних моделей для «розумних міст» [10], а також цифрову трансформацію логістичних ланцюгів постачання [13–15].

У інших джерелах автори [16–20] презентують низку прикладних досліджень, що стосуються інновацій у використанні судового палива (зокрема водневому), а також оцінки впливу енергоефективності на загальну експлуатаційну безпеку.

У роботах [17, 18] розглядаються концепції технологічних інновацій на морському транспорті, а роботи [19, 20] наголошують на важливості ризик-орієнтованого підходу до регулювання галузі з урахуванням глобальних трендів.

Таким чином, вивчення наявної літератури підтверджує актуальність розвитку моделей, які об'єднують екологічні, енергетичні та експлуатаційні аспекти безпеки морського транспорту.

**Мета та завдання дослідження.** Розробити і застосувати багатокритеріальну модель на базі методу TOPSIS для вибору оптимальної стратегії модернізації судна з метою зниження викидів CO<sub>2</sub>.

Завдання дослідження складаються з наступних завдань:

- сформувати множину альтернатив технічного оновлення судна;
- визначити систему критеріїв оцінювання, враховуючи техніко-економічні та екологічні показники;
- здійснити нормалізацію, вагове оцінювання та обчислення ранжування за методом TOPSIS;

– провести інтерпретацію результатів та сформулювати практичні рекомендації.

### Основний матеріал

Зниження викидів парникових газів у морському транспорті є ключовим завданням сучасної екологічної політики в рамках реалізації цілей сталого розвитку та зобов'язань за Паризькою угодою. Згідно з оцінками міжнародних організацій, морський флот відповідає за понад 2% глобальних викидів CO<sub>2</sub>, що створює значний вплив на кліматичну систему. Одним із стратегічних напрямів декарбонізації є технічна модернізація суден із впровадженням інноваційних енергоефективних рішень. Водночас різноманіття доступних технологій, їх витрати, ефективність та пов'язані ризики створюють складність для ухвалення обґрунтованих управлінських рішень, що зумовлює актуальність застосування багатокритеріальних методів оцінювання, які дозволяють комплексно порівняти альтернативи та визначити оптимальну стратегію щодо оновлення флоту.

**Методологія дослідження.** Для вирішення поставленої задачі у роботі використано багатокритеріальний метод оцінювання альтернатив TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). Метод дозволяє порівняти декілька варіантів рішень за множиною як кількісних, так і якісних критеріїв, що мають різну спрямованість (мінімізація/максимізація), і ранжувати альтернативи за ступенем близькості до умовно найкращого (ідеального) та найгіршого (антиідеального) рішень. Логіка методу TOPSIS полягає в тому що він ґрунтується на наступній логіці що найкраще рішення це те, яке найближче до ідеального і надалі від анти ідеального тобто всі альтернативи порівнюються за евклідовою відстанню до цих двох умовних крайніх точок. Основні етапи алгоритму TOPSIS складаються з наступних:

1. Формування матриці прийняття рішень. Матриця  $X = [x_{ij}]$  містить альтернативи  $A_i$  (рядки) та критерії  $C_j$  (стовпці).

2. Нормалізація значень. Кожен елемент нормалізується за формулою:

$$r_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}, \quad (1)$$

3. Зважування нормалізованої матриці. Нормалізовані значення множаться на ваги критеріїв  $w_j$ :

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij}, \quad (2)$$

де сума ваг дорівнює одиниці.

4. Визначення ідеального  $A^+$  та антиідеального  $A^-$  рішень. Для кожного критерію обирається найкраще і найгірше значення з урахуванням спрямованості оптимізації (макс або мін).

5. Обчислення відстаней до ідеалу і антиідеалу:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad (3)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}.$$

6. Обчислення індексу близькості (рейтинг):

$$C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-). \quad (4)$$

Значення  $C_i \in [0;1]$ , де чим ближче до 1, тим краща альтернатива.

**Альтернативи та критерії оцінювання.** У рамках моделі проаналізовано п'ять альтернативних сценаріїв модернізації судна, кожен з яких передбачає впровадження окремого технічного або операційного рішення з потенціалом скорочення викидів CO<sub>2</sub>. Вибір альтернатив базується на актуальних технологічних тенденціях у галузі морського транспорту.

У табл. 1 наведено п'ять стратегій модернізації суден, які становлять альтернативи у моделі багатокритеріального оцінювання. Кожна альтернатива передбачає технічне рішення, спрямоване на підвищення енергоефективності та зменшення викидів CO<sub>2</sub>, і характеризується певними витратами, ризиками та екологічною ефективністю.

Таблиця 1 – Альтернативи модернізації суден

Код	Назва альтернативи	Короткий опис
A <sub>1</sub>	Dual-fuel LNG engine	Переобладнання двигуна для роботи на LNG
A <sub>2</sub>	Shore power integration	Живлення судна електрикою в порту
A <sub>3</sub>	Slow steaming strategy	Обмеження крейсерської швидкості
A <sub>4</sub>	Air lubrication system	Подача повітря під корпус для зменшення тертя
A <sub>5</sub>	Hull coating optimization	Поліпшене антикорозійне покриття корпусу

Оцінювання ефективності кожної альтернативи здійснюється за п'ятьма критеріями, які охоплюють ключові економічні, екологічні та технічні параметри. Вибір критеріїв базується на сучасних вимогах до судноплавства в умовах енергетичного переходу. Зокрема, приділяється особлива увага потенціалу скорочення викидів та термінам окупності.

У табл. 2 подано систему критеріїв із зазначенням їхньої спрямованості оптимізації та ваги.

Сформована система критеріїв дозволяє здійснити комплексну багатофакторну оцінку кожної з технологічних альтернатив, забезпечуючи збалансований підхід до аналізу ефективності модернізації суден.

**Формування матриці рішень і розрахунок рейтингу за методом TOPSIS.** Після визначення альтернатив та системи критеріїв було сформовано матрицю прийняття рішень  $X = [x_{ij}]$ , де кожен елемент  $x_{ij}$  представляє значення критерію  $j$  для альтернативи  $i$ .

Таблиця 2 – Критерії оцінювання альтернатив модернізації

Код	Критерій	Спрямованість	Вага критерію
C <sub>1</sub>	CAPEX (млн USD)	Мінімізується	0.20
C <sub>2</sub>	OPEX saving per year (млн USD)	Максимізується	0.20
C <sub>3</sub>	Payback period (роки)	Мінімізується	0.15
C <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub> reduction (тонн/рік)	Максимізується	0.30
C <sub>5</sub>	Technical risk (оцінка експерта, 1-5)	Мінімізується	0.15

У табл. 3 наведено вихідні значення для п'яти обраних альтернатив модернізації суден.

Для коректного застосування методу TOPSIS, матриця нормалізується векторним методом (2).

Після цього нормалізована матриця зважується за допомогою вектору ваг  $w_j$ , отримуючи зважену матрицю  $V = [v_{ij}]$  (2).

Далі визначаються ідеальний розв'язок  $A^+$  та антиідеальний розв'язок  $A^-$ , які формуються шляхом

вибору максимальних або мінімальних значень відповідно до спрямованості критеріїв. Відстані кожної альтернативи до ідеального та антиідеального рішень обчислюються за формулами (3). На фінальному етапі розраховується індекс близькості до ідеального рішення (4).

Таким чином цей показник визначає ранг кожної альтернативи: чим ближче  $C_i$  до 1, тим ефективнішою є стратегія з точки зору комплексної оцінки.

Таблиця 3 – Матриця прийняття рішень

Альтернатива	C <sub>1</sub> : CAPEX	C <sub>2</sub> : OPEX saving	C <sub>3</sub> : Payback	C <sub>4</sub> : CO <sub>2</sub> reduction	C <sub>5</sub> : Risk
A <sub>1</sub> : LNG engine	8.5	1.7	5.0	22000	2
A <sub>2</sub> : Shore power	3.0	0.6	5.0	12000	3
A <sub>3</sub> : Slow steaming	0.6	0.8	0.75	15000	4
A <sub>4</sub> : Air lubrication	2.2	0.5	4.4	8000	2
A <sub>5</sub> : Hull coating	0.9	0.3	3.0	5000	1

**Інтерпретація результатів і ранжування альтернатив.** На основі проведених обчислень було отримано індекси близькості  $C_i$  до ідеального рішення для кожної з п'яти альтернатив модернізації. Табл. 4 відображає результат ранжування згідно з методом TOPSIS, де вищий рейтинг означає кращу сукупну ефективність альтернативи з урахуванням усіх критеріїв.

Таблиця 4 – Рейтинг альтернатив модернізації за методом TOPSIS

Альтернатива	TOPSIS Score	Ранг
A <sub>3</sub> : Slow steaming strategy	0.826	1
A <sub>1</sub> : Dual-fuel LNG engine	0.662	2
A <sub>5</sub> : Hull coating optimization	0.519	3
A <sub>2</sub> : Shore power integration	0.459	4
A <sub>4</sub> : Air lubrication system	0.312	5

Найвищий рейтинг отримала стратегія повільного ходу або на зменшених швидкостях (Slow steaming). Вона поєднує низькі інвестиційні витрати, прийнятний строк окупності та значний екологічний ефект при відносно помірному ризику впровадження. На другому місці у ранжуванні двопаливний двигун

(LNG), який забезпечує найвищий рівень скорочення викидів, проте має суттєво вищий CAPEX. Найменш ефективною виявилася стратегія «повітряної подушки», яка має низький екологічний ефект і незначну економію витрат. Для оцінки сильних і слабких сторін кожної з розглянутих альтернатив побудовано діаграму на рис. 1, яка дозволяє візуально зіставити показники за п'ятьма ключовими критеріями: капітальні витрати (CAPEX), щорічна економія (OPEX saving), строк окупності (Payback), скорочення викидів CO<sub>2</sub> та технічний ризик. Кожна вісь діаграми відображає нормалізоване значення відповідного критерію в діапазоні [0; 1], де більший радіус вказує на кращий результат.

Аналіз діаграми підтверджує, що стратегія Slow steaming демонструє збалансовані переваги за всіма критеріями: найменші витрати, швидкий період окупності, відносно високий екологічний ефект та прийнятний ризик. Стратегія «LNG engine», попри високі початкові витрати, має найбільший потенціал зниження викидів CO<sub>2</sub>.

Втім «Hull coating optimization» забезпечує найнижчий технічний ризик та невисокі витрати, однак поступається в екологічній ефективності. Щодо стратегій «shore power» та «air lubrication» то вони демонструють менш збалансовані профілі при невисоких витратах мають або обмежену екологічну користь, або вищий ризик.

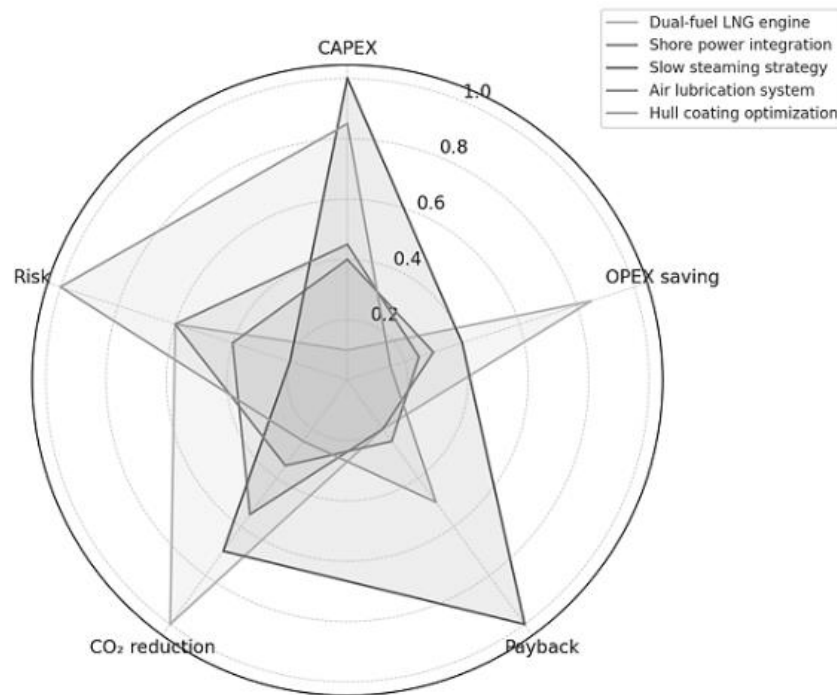


Рис. 1. Профілі альтернатив модернізації суден за ключовими критеріями

Таким чином, діаграма дозволяє наочно представити компромісні рішення між економічними, екологічними та технічними аспектами і може бути використано як інструмент для підтримки прийняття рішень.

### Висновки

Результати багатокритеріального аналізу демонструють, що поєднання екологічної ефектив-

ності, економічної доцільності та низького технічного ризику дозволяє ідентифікувати повільний хід як найбільш збалансовану стратегію модернізації суден у сучасних умовах. Метод TOPSIS представляє собою ефективний інструмент для кількісного обґрунтування управлінських рішень у сфері морського транспорту, а результати дослідження можуть бути використані при формуванні інвестиційних програм, технічних аудитів судноплавних компаній.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tamilvanan, A., Mohanraj, T., Ashok, B., & Santhoshkumar, A. (2023). Enhancement of energy conversion and emission reduction of Calophyllum inophyllum biodiesel in diesel engine using reactivity controlled compression ignition strategy and TOPSIS optimization. *Energy*, 264, 126168. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126168>
2. Kirankumar, K., Kumar, G., Kamath, N., & Gangadharan, K. (2024). Experimental investigation and optimization of performance, emission, and vibro-acoustic parameters of SI engine fueled with n-propanol and gasoline blends using ANN-GA coupled with NSGA3-modified TOPSIS hybrid approach. *Energy*, 306, 132521. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132521>
3. Bhumula, K. B., & Kumar, G. N. (2024). Using CRITIC-TOPSIS and python to examine the effect of 1-Hepatnol on the performance and emission characteristics of CRDI CI engine with split injection. *Heliyon*, 10(11), e31484. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31484>
4. Das, S., Tamang, S. K., & Kalita, P. (2025). An integrated ANFIS-TOPSIS approach for enhanced performance and emissions characteristics in syngas-diesel powered dual-fuel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 139, 1116-1132. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.414>
5. Han, Y., Ji, W., Liu, L., Cao, L., Ping, W., & Fan, J. (2025). Impact of the National Economy and Air Pollutant Emissions on Chinese Energy Mix: Evidence from an SBMDEA-TOPSIS Model. *Energy*, 136098. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136098>
6. Bathala, R., G. H., Rajkumar, S., S, D. A., & Jeyaseelan, T. (2024). Experimental investigation, ANN modeling, and TOPSIS optimization of gasoline-alcohol blends for minimizing tailpipe emissions of a motorcycle. *Energy*, 293, 130698. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130698>
7. Negarestani, M. N., Hajikandi, H., Fatehi-Nobarian, B., & Majrouhi Sardroud, J. (2024). Introducing green structure based on the pattern of TOPSIS method by grey wolf algorithm. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability*. <https://doi.org/10.1680/jensu.23.00096>
8. Iqbal, M., Fan, Y., Ahmad, N., & Ullah, I. (2025). Circular economy solutions for net-zero carbon in China's construction sector: A strategic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 504, 145398. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145398>
9. Hu, M., Fan, B., Wang, H., Qu, B., & Zhu, S. (2016). Constructing the ecological sanitation: A review on technology and methods. *Journal of Cleaner Production*, 125, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.012>
10. Hoang, A. T., Pham, V. V., & Nguyen, X. P. (2021). Integrating renewable sources into energy system for smart city as a sagacious strategy towards clean and sustainable process. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127161>

11. Shuai, J., Xiong, X., Huang, C., Zhao, Y., Chen, X., & Shuai, C. (2025). What is the impact of EU's carbon border adjustment mechanism on the economy and emissions reduction of its electric power trading partners? *Journal of Cleaner Production*, 145517. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145517>
12. Huang, X., Wen, Y., Zhang, F., Han, H., Huang, Y., & Sui, Z. (2023). A review on risk assessment methods for maritime transport. *Ocean Engineering*, 279, 114577. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114577>
13. Ali, Y., Saad, T. B., & Rehman, O. U. (2019). Integration of IoT technologies in construction supply chain networks; CPEC a case in point. *Sustainable Operations and Computers*, 1, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2020.12.003>
14. Mohammed, A., Naghshineh, B., Spiegler, V., & Carvalho, H. (2021). Conceptualising a supply and demand resilience methodology: A hybrid DEMATEL-TOPSIS-possibilistic multi-objective optimization approach. *Computers & Industrial Engineering*, 160, 107589. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107589>
15. Iqbal, M., Fan, Y., Ahmad, N., & Ullah, I. (2025). Circular economy solutions for net-zero carbon in China's construction sector: A strategic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 504, 145398. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145398>
16. Мельник О. М., Волошин А. О., Онищенко О. А., Щербина О. В., Васалатій Н. В., Никитюк П. В. Організація забезпечення інформаційної безпеки морського судна. // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2022. № 201. С. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.201.2022.267758>
17. Melnyk O., Shcherbina O., Mykhailova I., Obnyavko T., Korobko T. Focused research on technological innovations in shipping industry: review and prospects. // *Transport Development*. 2023. № 1(16). С. 164–174. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.13>
18. Мельник О. М., Шумило О. М., Онищенко О. А., Михайлова Ю. В., Обнявко Т. С., Коробко Т. О. Концепція та перспективи використання водневого палива на морському транспорті. // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2023. № 203. С. 96–105.
19. Мельник О. М. Оцінка впливу енергоефективності на безпеку експлуатації судна. // *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2023. № 2(39). С. 76–81. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-2.11>
20. Мельник О. М. Актуальні проблеми безпеки морського транспорту: тенденції, ризики та стратегії врегулювання. // *Водний транспорт*. 2023. № 1(37). С. 116–126. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.13>

Received (Надійшла) 17.04.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.07.2025

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Булгаков Микола Петрович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри судноводіння і морська безпека, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна;

**Mykola Bulgakov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Navigation and Maritime Safety, Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine;  
e-mail: [npbulgakov2@gmail.com](mailto:npbulgakov2@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-7172-8678>;  
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57312351600>.

**Логінов Олег Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри судноводіння і морська безпека, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна;

**Oleh Lohinov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Navigation and Maritime Safety, Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine;  
e-mail: [ologinov@ukr.net](mailto:ologinov@ukr.net); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-4540-731X>;  
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57212620234>.

**Мельник Олексій Миколайович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри судноводіння і морська безпека, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна;

**Oleksii Melnyk** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Navigation and Maritime Safety, Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine;  
e-mail: [m.onmu@ukr.net](mailto:m.onmu@ukr.net); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-9228-8459>;  
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216657937>.

#### Multi-criteria evaluation of ship modernization strategies for CO<sub>2</sub> emission reduction based on the topsis method

Mykola Bulgakov, Oleh Lohinov, Oleksii Melnyk

**Abstract. Relevance.** In the context of implementing a decarbonization strategy for maritime transport, the task of selecting the optimal ship modernization strategy becomes particularly relevant. Such a strategy must reduce CO<sub>2</sub> emissions while maintaining economic viability and technical feasibility. Given the diversity of available alternatives—differing in cost, payback period, environmental impact, and risk—a comprehensive decision-making method is required. **Object of research:** a multicriteria model for evaluating ship modernization strategies. **Purpose:** to apply the TOPSIS method to determine the most effective ship modernization alternative, taking into account economic, environmental, and engineering factors. **Results.** The study analyzes five ship modernization strategies. An integrated efficiency indicator was calculated using five evaluation criteria. The analysis results show that the slow steaming strategy presents the most balanced profile. **Conclusions.** The TOPSIS model proved effective for ranking modernization alternatives based on multiple criteria and can be used to support informed decision-making in sustainable maritime transport project management.

**Keywords:** maritime transport, ship modernization, CO<sub>2</sub> emissions, slow steaming strategy, multicriteria assessment, energy efficiency, environmental protection, sustainable development, environmental safety, maritime transport, project management.

Є. А. Толкаченко<sup>1</sup>, О. В. Коломійцев<sup>2</sup>, С. В. Осієвський<sup>1</sup>, А. В. Самокіш<sup>1</sup>, В. І. Панченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ОЦІНКИ ПЛОЩІ ПОВЕРХНІ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ, ЩО ВІДБИВАЄ НА ОСНОВІ ПРОГРАМНИХ ПАКЕТІВ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

**Анотація. Актуальність.** При розробці літальних апаратів військового призначення, як безпілотних так і пілотованих, гостро стоїть завдання щодо зниження їх радіолокаційної помітності. Існують складні програмні продукти, які з великою точністю здатні розрахувати ефективну поверхню розсіювання літального апарату будь-якої форми. Однак, їх об'єднує вимогливість щодо обчислювальних ресурсів при моделюванні радіосигналу, що відбитий від складної форми літального апарату. Така вимогливість призводить до великих витрат часу при необхідності ітераційної зміни форми літального апарату. **Об'єкт дослідження:** процес оцінки ефективної поверхні розсіювання літальних апаратів за допомогою тривимірного моделювання. **Мета статті:** розробка пропозицій щодо використання програмних пакетів тривимірного моделювання для швидкої та наближеної оцінки площі поверхонь літальних апаратів, що відбивають електромагнітне випромінювання для попередньої оцінки їх помітності у радіолокаційному діапазоні. **Результати дослідження.** Для зниження витрат обчислювальних ресурсів та швидкої оцінки площі поверхонь літальних апаратів використовують його спрощену форму моделі, що знижує точності обчислень. В роботі обґрунтовано використання пакетів тривимірного моделювання, наприкладі Blender 3D з відкритим кодом для дослідження радіолокаційного відбиття від моделі літального апарату, засновуючись на методах та припущеннях геометричної оптики. **Висновки.** Використання пакетів тривимірного моделювання для попереднього та швидкого отримання форми літального апарату актуально на етапі ескізного проектування. Використання різноманітних шейдерів поверхні тривимірної моделі літального апарату необхідне для імітації заломлення, відбиття та поглинання радіохвиль.

**Ключові слова:** літальний апарат, метод математичного моделювання, комп'ютерне моделювання, програмування, дальнісний портрет, оптичний метод.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Спостереження за відбиттям радіохвиль від перешкод, на рівні отримання якісних оцінок, походились з часів Г. Герца. У 1903 році Х. Хюльсмейером був отриманий патент на «пристрій для виявлення перешкод», який засновано на експериментах по відбиттю радіохвиль від корабля. Такий підхід, також, запропоновано Г. Марконі у 1922 році. У підходах використовувалось безперервне немодульоване радіолокаційне випромінювання. Пізніше, у 1925 році, почали застосовувати частотну модуляцію радіосигналу та імпульсне випромінювання для вивчення відбиття від іоносфери [1].

Однак, апаратні розробки, які дозволяли отримати кількісні оцінки розсіювання, з'явилися тільки з початком розвитку радіолокації. У 30-х роках, з появою перших радіолокаційних станцій (РЛС), почалися експерименти по вивченню розсіювання радіохвиль від літаків у режимі польоту. Спочатку, це були вимірювання двопозиційної ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) літального апарату (ЛА), коли випромінювач та приймач є різними антенами. З винаходом швидкісного антенного перемикача (у 1936 році), почалися експерименти з вимірюванням одно-позиційної ЕПР ЛА [3].

Одночасно, розвивались лабораторні методи вимірювання. Оптичне моделювання (рис. 1) було одним з перших засобів, що дозволяло не тільки виділяти основні джерела розсіювання на поверхні складних ЛА, але й давало кількісну оцінку інтенсивності відбитого сигналу [4]. Вимірювання проводилось у приміщенні, на стіни якого наносилось чорне покриття. Для імітації реальних умов відбиття

радіохвиль, для яких поверхня ЛА є ідеально гладкою, моделі полірувались.



Рис. 1. Оптичне моделювання [4]

У таких експериментах було неможливо виконати усі умови, які необхідні для отримання точного результату. Оскільки джерела когерентного світла у ті часи були відсутніми, оптичні методи не могли досить точно імітувати сигнал, й оцінка розсіювання, що отримувалась, була результатом некогерентної суми. Тобто, сум потужностей, відбиття від окремих частин поверхні ЛА без врахування фазових співвідношень. Крім того, неможливо було досягти пропорційної зміни розмірів моделі ЛА та довжин хвилі. Тому, більш менш якісні кількісні оцінки могли бути отримані тільки для достатньо довгих гладких поверхонь, подвійної кривизни, для яких ЕПР практично не залежало від довжини хвилі.

Оптичне моделювання використовують досі для якісного аналізу геометрії ЛА та виявлення “яс-

кравих точок” конструкції для наступних, більш детальних досліджень іншими методами.

Таким чином, використання сучасних програмних пакетів тривимірного моделювання для швидкої наближеної оцінки площі поверхні, що відбиває, ЛА є актуальним науковим завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Гідроакустичне моделювання [5], на відміну від оптичного, дозволяє отримати візуальне представлення про процеси, які відбуваються при розсіюванні радіохвиль на різних об'єктах за умови наближення довжини хвилі до розмірів тіла, що досліджується.

У основі експерименту лежить схожість рівнянь, які описують хвильові процеси у області гідродинаміки з рівняннями електромагнітного поля, що дозволяє провести аналогію між двома розділами фізики, незважаючи на те, що вони значно відрізняються. Основною задачею дослідження є створення ідентичних умов на поверхні тіла та поверхнях ванни (боковин і днища).

Незважаючи на те, що отримати кількісні показники розсіювання, таким чином не можливо, однак, експерименти підтвердили існування на поверхні розсіювання біжучих та повзучих хвиль.

Відносно точні кількісні оцінки ЕПР невеликих тіл проводились шляхом вимірювання коефіцієнту стоячої хвилі [5], аналогічно тому, як це робиться у височастотних лініях зв'язку (рис. 2). Так само, як по вимірюванню стоячої хвилі у лінії зв'язку можливо визначити імпеданс на її кінці, так перетин розсіювання об'єкту можливо визначити за результатами вимірювання стоячих хвиль, у просторі між об'єктом та антеною, що його опромінює.

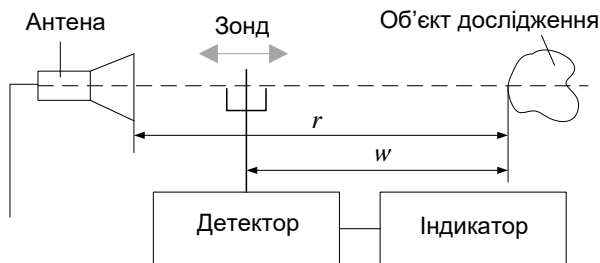


Рис. 2. Вимірювання ЕПР методом стоячої хвилі [6]

За умови, якщо точка розташування зонду знаходиться у зоні об'єкту та антени, а амплітуда падаючої  $E_i$  та розсіяної  $E_s$  змінюються від відстані за законом  $1/r$ , тоді у точці розташування зонду їх можливо обчислити за такими формулами:

$$E_i = \frac{E}{r-w}; \quad E_s = \frac{EK_{\text{ВІД}}}{w},$$

де  $K_{\text{ВІД}}$  – коефіцієнт відбиття від тіла;  $r$  – відстань між тілом та антеною;  $E$  – амплітуда електричного поля, яке випромінюється у розкритті антени.

За умови, якщо відстань  $r$  настільки значна, що у межах переміщень зонда  $E_i$  залишається незмінним, тоді:

$$\sigma = 4\pi \left| K_{\text{ВІД}}^2 \right|,$$

де  $K_{\text{ВІД}} = w_i (K_{\text{СТV}} - 1) / ((w_1/w_2) \cdot K_{\text{СТV}} + 1)$ ;  $w_1$  – відстань від моделі до максимуму поля;  $w_2$  – відстань від мінімуму поля;  $K_{\text{СТV}}$  – обчислюється як

$$K_{\text{СТV}} = \frac{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}.$$

Використання ефекту Доплера дозволяє відокремити відбитий сигнал від випроміненого, а, також, від паразитних відбиттів, які створені предметами, що оточують установку.

Для адаптації даного методу до лабораторних вимірювань, запропоновано встановити модель об'єкту таким чином, щоб у процесі вимірювання вона рухалась по колу (рис. 3).

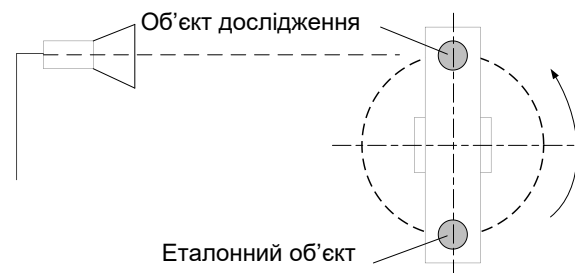


Рис. 3. Схема експерименту з використанням ефекту Доплера для виділення відбитого сигналу

На протилежному кінці поворотного приладу, розташовується еталонний об'єкт. Діаграма направленості антени повинна бути достатньо вузькою для того, щоб у кожний момент часу опромінювався тільки один з об'єктів.

При обертанні системи модель та еталон за чергою проходять поле випромінювання антени. Комутація прийомного каналу синхронізована з обертанням таким чином, щоб реєстрація розсіяного сигналу проводилась у той момент, коли радіальна швидкість об'єкту максимальна. Тобто, коли об'єкт рухається точно на передатчик [7].

Прийнятий сигнал, частота якого має зсув відносно того сигналу, який випромінюється, зміщується з базовим сигналом випромінювача, створюючи сигнал з частотою:

$$\Delta f = 2 \frac{Vf}{c}$$

та амплітудою, яка пропорційна амплітуді хвилі, що падає.

За умови, якщо процеси, які проходять при обробці сигналу лінійні, а відстань до об'єкту, відповідає дальній зоні, то квадрат відношення сигналів (відбитого від еталону та від об'єкту) буде дорівнювати ЕПР об'єкту, що досліджується. Точність таких досліджень складає  $\pm(5-10)\%$ .

Для дослідження ЕПР великих об'єктів на малих відстанях використовуються методи фокусування випромінювання у ближній зоні [8]. Фокусування можливо досягти, використовуючи лінзи, або дзеркальні коліматори, що перетворюють сферичну хвилю у пласку на невеликих відстанях від себе. Розсіяне поле вимірюється спеціальним рухомим антен-

ним зондом, що розташовується поблизу об'єкту дослідження. Обробка результатів експериментів дає можливість обчислити значення ЕПР.

У коліimatorних пристроях, антена система складається з 1-3 дзеркальних параболических антен з 1-2 випромінювачами. Система зондів складається з слабо-направленого рухомого приймально-передаючого зонду, що сканує у одній, або двох площинах за заздалегідь визначеним алгоритмом. Приклад перетворення сферичної хвилі у пласку наведено на рис. 4.

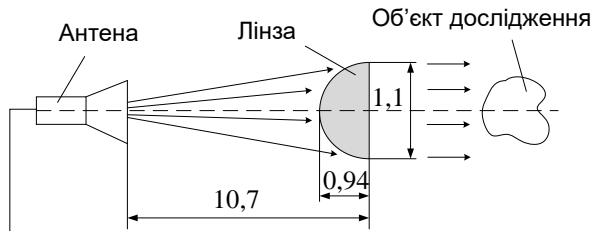


Рис. 4. Схема вимірювання розсіювання за допомогою лінзи

Знаючи розмір об'єкту та довжину хвилі можливо обчислити мінімально необхідні розміри стенду. Так, якщо необхідно визначити ЕПР об'єкту з перетином у 1 м на довжині хвилі 3,33 см, необхідна відстань для вимірювання у дальній зоні дорівнює 60 м.

За умови, якщо матеріал лінзи з низькою діелектричною проникністю, наприклад пінопласт  $\epsilon = 1,03$ , тоді можливо отримати плоский фронт з перетином 1 м вже на відстані 10,7 м.

Таким чином, використання надвисокочастотних (НВЧ) лінз дозволяє зменшити відстань до дальньої зони приблизно у 6 разів.

Також, інформацію, щодо розсіяного поля у дальній зоні, можливо отримати за зміною полів на поверхні розсіювача. Те, що хвиля сферична, може бути враховано при обробці результатів вимірювання. За основу методу поверхневого зондування вважається можливість конвертації таких вимірювань у полі дальньої зони, шляхом обчислення інтегралу за поверхнею. Вимірювання поля поблизу поверхні проводиться спеціальним зондом [9].

Недоліком методу є наявність дротів, що під'єднані до апаратури та вносять похибку у вимірювання. Тому, застосування зондування більш розповсюджене у науковій діяльності. Для досягнення практичних цілей такий метод бажано уникати. Експериментальні методи визначення радіолокаційної помітності ЛА. Можливо виділити наступні напрями у методах дослідження обчислення ЕПР для ЛА.

*Випробування на полігоні, вимірювання ЕПР реальних ЛА.* Такі вимірювання можуть проводитись з рухомими та нерухомими ЛА.

Вимірювання ЕПР для невеликих ЛА у камерах, що мають мінімальне відбиття, можливо зробити у дальній зоні прямим методом, або у ближній — за допомогою коліimatorів. Також, використовується відтворення поля розсіювання дальньої зони за вимірюванням поля на поверхні об'єкту.

*Моделювання математичне та програмне, що дозволяє отримати якісні і кількісні характеристики*

*ЕПР об'єктів, що досліджуються.* Методи, які базуються на проведенні експериментів є набагато складнішими у реалізації. Вони вимагають більших фінансових витрат та спеціального обладнання. Однак, такі методи дозволяють обчислити більш точно значення ЕПР.

Математичне моделювання — не враховує суперпозиції усіх чинників. Тому, дає менш точні результати обчислення ЕПР об'єкту. Однак, дозволяє швидко побудувати модель об'єкту та обчислити його ЕПР з мінімальними витратами.

Таким чином, математичне та програмне моделювання частіше використовується при розробці та пошуку оптимальних форм ЛА.

Експериментальні методи є більш точними. Однак, вони складніші та більш витратні. Використовуються для фінального дослідження розробленого виробу.

Таким чином, експериментальні та математичні методи обчислення ЕПР доповнюють одне одного та використовуються на різних етапах розробки ЛА.

Хоча, існує безліч способів проведення експериментів, найчастіше використовують два основних методи: випробування на полігонах та вимірювання електромагнітної сумісності (ЕМС) невеликих пристроїв у спеціальних камерах, що мінімізують відбиття радіохвиль.

Для реалізації кожного з вище перерахованих методів необхідно створювати спеціальні комплекси. Приблизна класифікація таких комплексів наведена на рис. 5.

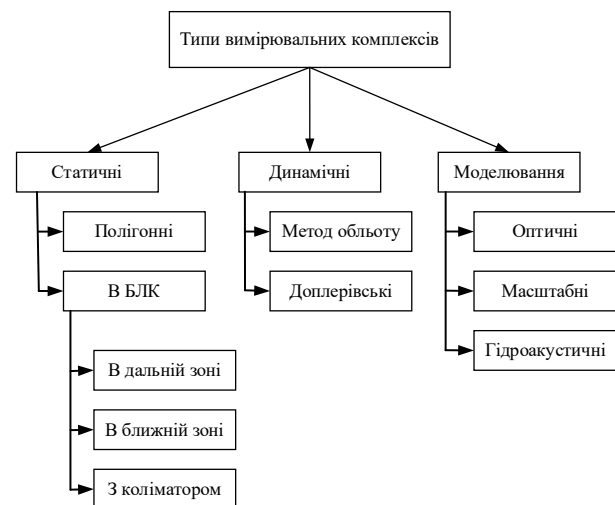


Рис. 5. Типи вимірювальних комплексів

В основі цих методів вимірювання ЕПР лежить або обчислення

$$\sigma = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} \left( R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \right)$$

або обчислення виразу, для потужності, що приймається апаратурою:

$$\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{випр}}} = \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma.$$

Серед багатьох типів сигналів та методів, які базуються на використанні зондів, можливо виділити три основних напрямки (рис. 6).

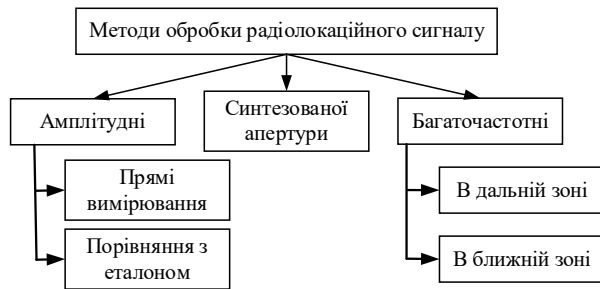


Рис. 6. Алгоритми обробки сигналів

Порівняння вимірювання амплітуд сигналів, які випромінюються та приймається із застосуванням радіолокаційних формул.

Когерентне часове накопичення енергії, яка відбивається та подальша обробка з урахуванням ефекту Доплера, що дозволяє підвищити розподільну здатність.

Використання широкосмугових або багато частотних сигналів. Найбільш точне значення ЕПР можливо отримати у порівнянні з еталоном. У якості еталону можливо використовувати металеві сфери заданого радіусу. Точне значення ЕПР таких сфер можливо обчислити теоретично. Також, можливо використовувати кутовий відбивач, диполі, диски – будь які геометричні фігури, у яких легко обчислити ЕПР теоретично. Однак, треба врахувати, що їх ЕПР може змінюватись залежно від кута опромінення.

Треба врахувати, що для вимірювання однополярізаційної ЕПР, коли випромінювання та приймання проводиться однією антеною, існує необхідність розділення зустрічних потоків енергії, що ускладнює технічну реалізацію експерименту.

У системах з безперервним опромінюванням розділення потоків відбувається у спеціальних трійниках або відгалужувачах. При цьому, частина потужності, яка приймається, передається у плече генератора та використовується для вимірювання й наступної компенсації паразитних відбиттів. Інша частина потужності передається на змішувач, що включений до плеча приймача та використовується для отримання результатів вимірювання.

Одним із різновидів описаних систем є системи з частотною модуляцією сигналу, що дозволяють забезпечити більш якісну компенсацію шумів. Для цього, частина сигналу використовується для формування на гетеродині приймача компенсуючої напруги. Різниця частот:

$$\Delta f = 2 \frac{Vf}{c} \frac{df}{dt},$$

буде різною для сигналів, які відбилися від предметів, що розташовані на різних відстанях. Тому, такі шуми можуть бути відфільтровані.

У системах, що використовують ефект Доплера та базуються на безперервному випромінюванні, а також – які призначені для визначення ЕПР об'єктів, що рухаються, розділення сигналів відбу-

вається за рахунок частотних зсувів хвиль, які випромінюються та приймаються. Потужність, яка приймається, змішується з сигналом генератора, а сигнал різницевої частоти подається на інтегруючий пристрій. При відносно довгому інтервалі інтегрування отримується сигнал, пропорційний відбитому сигналу. Порівняння даного сигналу з еталоном дає можливість обчислити значення ЕПР.

Недоліком систем з безперервним випромінюванням є неможливість забезпечення великої потужності та, відповідно, дальності дії таких систем є невеликою. Практичне застосування таких систем обмежене десятками метрів.

Імпульсні системи, що працюють за принципами радіолокації, мають значно більшу відстань зондування. Випромінювання та приймання таких сигналів розділене у часі. Однак, діапазон можливих робочих станів у таких системах обмежений знизу швидкістю переключення приймально-передаючого тракту. Тому, для вимірювання на невеликих відстанях, наприклад у камерах, використовуються окрема антена для передавача та окрема антена для приймача. Крім використання для обчислення ЕПР імпульсні системи застосовуються для дослідження процесів, які відбуваються на поверхні об'єкту, що опромінюються. Використання імпульсів малої тривалості ( $10^{-9}$  с) дозволяє розділити у часі відбиття від різних частин об'єкту та, таким чином, оцінити ЕПР для окремих частин об'єкту. Саме такими експериментами доведено наявність біжучих хвиль на поверхні об'єктів, що опромінюються.

Метод вимірювання у діапазоні частот, або на декількох частотах, базується на теоремі, що відбите від поверхні виміряне поле є тривимірним перетворенням Фур'є деякої функції розсіювання, яка залежить від характеристик об'єкту. Обчислення функції розсіювання на основі проведених експериментів дає змогу точно обчислити ЕПР при високій розподільній здатності. Тому, метод може бути застосований для обчислення ЕПР на зменшених копіях в умовах камер з мінімальним відбиттям.

Випробування на полігоні. При опроміненні об'єкту локатором, розмір ЕПР може бути обчислений на основі потужності прийнятого сигналу. Для мінімізації похибки перед випробуваннями потрібно провести калібрування локатору (рис. 7).

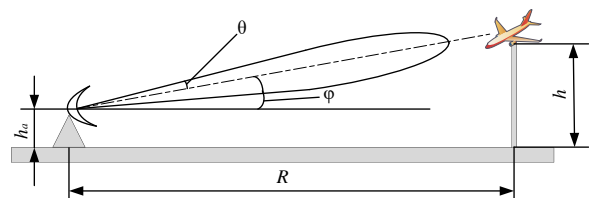


Рис. 7. Геометрія полігону вільного простору з похилим променем

Існує два основних підходи до полігонних випробувань. Статичні випробування – передбачають установку об'єкту на поворотну платформу. При цьому, платформа повинна бути піднята на деяку висоту над рівнем землі для мінімізації впливу відбитих від землі сигналів. Другий підхід полягає у

об'єкту, що постійно супроводжує локатор фіксує її ЕПР.

Другий підхід максимально наближений до реальних умов та враховує усі негативні фактори (шуми, відбиття, потужність локатору, методів обробки сигналу тощо). Однак, складність маневрів для розміщення об'єкту під потрібним кутом, велика вартість експериментів та мала ймовірність видворення тотожного результату (відповідно – низька точність отриманих даних) значно обмежують використання даного підходу. Полігони, на яких проводяться випробування, поділяються на два типи:

- полігони, де земна поверхня не приймає участі у формуванні розсіяного поля (полігон вільного простору);

- полігони, де використовують поверхню землі у якості площини, що є екраном.

У першому випадку – необхідно мінімізувати відбиття від землі, що досягається за максимальним збільшенням висоти, як об'єкту так й випромінювача.

У другому випадку – антена розташовується поблизу землі, а об'єкт піднімається на висоту першого інтерференційного максимуму:

$$h = \frac{R\lambda}{4h_a}$$

Даний підхід дозволяє значно зменшити розмір полігону. Однак, при випробуваннях на таких полігонах виникають значні складнощі при вимірюванні з використанням горизонтальної та кругової поляризації. Тому, частіше [10], використовуються полігони вільного простору (рис. 8).

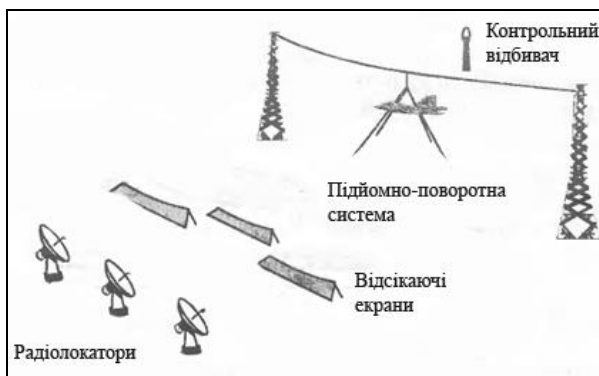


Рис. 8. Приклад полігону вільного простору [4]

*Вимірювання у камері з мінімальним відбиттям.* Велика вартість випробувань на полігоні, залучення надзвичайно потужних випромінювачів, вплив погодних факторів, велика складність організації випробувань змушує дослідників при можливості шукати більш прості та дешеві підходи. Одним з таких підходів є дослідження у камері з мінімальним відбиттям, за умови, якщо це дозволяють розміри об'єкту, або його моделі [11].

Оскільки ЕПР навіть одного об'єкту може змінюватись у доволі суттєвих межах, необхідно забезпечити діапазон вимірювань у декілька порядків. Особливо складно організувати вимірювання малих

рівнів ЕПР, оскільки для цього потрібно використовувати апаратуру дуже високої якості у поєднанні з методами мінімізації шуму.

На вимірювання, також, впливають розміри камери та її форма. Наприклад, прямокутна форма камери допускає багатопрорізне розповсюдження енергії між випромінювачем та об'єктом, що приводить до збільшення похибки вимірювання.

Для зниження фону між передаючою та приймаючою апаратурою встановлюються поглинаючі екрани. Внутрішня поверхня камери покривається поглинаючими матеріалами. Проводяться роботи по зменшенню впливу бокових пелюсток приймальної та передаючої антен.

У камерах використовуються ті ж самі типи опорно поворотних пристроїв, що і на полігонах. Умови вимірювання у камері дають можливість мінімізації впливу опори. Для цього, перед початком випробувань у відсутності об'єкту реєструються параметри відбиття, які характеризують опору. Після цього, поправки враховуються при обчисленні результатів експериментів з випробування об'єкту.

Оскільки відносно невеликі розміри камери не дозволяють організувати перемикання апаратури між режимами прийому та передачі, використовується двопозиційний режим – коли одна антена випромінює, а друга приймає сигнал. Такий підхід викликає необхідність у зіставленні вимірювання двопозиційної ЕПР з однопозиційною, що відповідає для відносно гладких тіл. Такий факт необхідно враховувати при організації експериментів з ЛА.

З розвитком сучасної комп'ютерної техніки, також, активно розвивається напрямок щодо обчислення ЕПР, який базується на математичному моделюванні. Математичне моделювання не може дати дуже точні результати. Однак, математичне моделювання досягло значних успіхів у наближенні обчислених результатів до реальних, полігонних випробувань. Проте, такі обчислення мають характер досить складних, що, у свою чергу, потребує багато часу, навіть з сучасними потужними комп'ютерами. Це пов'язано, в першу чергу, з ускладненням форми об'єктів та їх більшою деталізацією.

Описаний метод оцінки радіолокаційних відображень реалізує всередині пакету тривимірної моделювання оптичний метод моделювання відображень без урахування фазових співвідношень. Подібне моделювання використовувалось одним з перших серед експериментальних методів, що дозволяло не лише проводити якісну оцінку відображень літальних апаратів а й деякою мірою і кількісну. Сучасні підприємства не здатні ефективно конкурувати на світовому ринку, якщо не створюватимуть нові продукти з вищою якістю, нижчою собівартістю та в коротші строки. Для досягнення цього вони активно застосовують потужності оперативної пам'яті комп'ютера, високу швидкість обчислень процесору та зручний графічний інтерфейс, щоб автоматизувати і інтегрувати процеси проектування та виробництва, які раніше були розрізненими і трудомісткими. Такий підхід дає змогу скоротити час і витрати на розробку та випуск продукції.

За такою метою впроваджуються технології автоматизованого проектування (Computer-Aided Design, CAD), автоматизованого виробництва (Computer-Aided Manufacturing, CAM) та автоматизованої розробки і інженерного аналізу (Computer-Aided Engineering, CAE). Дані системи, відомі як САПР (системи автоматизованого проектування). Вони об'єднують різноманітні завдання та операції, які виконуються під час створення та виробництва продукту. Сукупність таких завдань формує життєвий цикл продукту (product cycle) [12, 13].

Процес виробництва починається з формування технічних вимог та завершується доставкою готової продукції замовнику. Етапи розробки можливо поділити на аналітичні та синтетичні. Початкові етапи, такі як: визначення потреби у розробці, формулювання технічних вимог, аналіз можливостей реалізації та збір необхідної інформації, а також створення концепції, належать до синтетичного підпроцесу. Його результатом є концептуальний проєкт продукту у вигляді ескізу або топологічного креслення, що демонструє взаємозв'язки між компонентами. На даному етапі здійснюються основні фінансові інвестиції, а також визначається функціональність майбутнього виробу.

Більшість інформації, створеної та опрацьованої у синтетичному підпроцесі, має якісний характер, який ускладнює її автоматизовану обробку. Після створення концептуального проєкту, розпочинається аналітичний підпроцес, який містить аналіз та оптимізацію. Для цього, спочатку створюється аналітична модель, оскільки аналізу піддається саме модель, а не проєкт у цілому. Попри розвиток комп'ютерних технологій, використання аналітичних моделей залишається необхідним. Такі моделі спрощують проєкт, зводячи розмірності, видаляючи незначні деталі та враховуючи симетрію. Наприклад, тонкий лист замінюють площиною зі вказаною товщиною, а тонкі ділянки – лініями із заданими параметрами. Симетрія дозволяє аналізувати лише частину об'єкта.

За умови, якщо проєктування завершено, а параметри оптимізовано, тоді розпочинається етап оцінки проєкту. Для цього, можуть виготовлятися прототипи. Технологія швидкого прототипування (rapid prototyping), яка стає дедалі популярнішою, дає змогу створювати прототипи безпосередньо з проєктних даних, використовуючи лише інформацію про поперечні перерізи конструкції. За умови, якщо оцінка виявляє невідповідність проєкту вимогам, тоді процес розробки повторюється.

У разі успішної оцінки проєкту формується проєктна документація, яка містить креслення, звіти та переліки матеріалів. Креслення копіюються та передаються у виробництво.

Процес виробництва починається з етапу планування, яке здійснюється на основі креслень, підготовлених під час проєктування, і завершується створенням готової продукції. Технологічна підготовка виробництва передбачає визначення технологічних процесів виготовлення виробу та встановлення їх технічних параметрів. Одночасно, підбира-

ється обладнання для виконання операцій, таких як формування деталі із заготовки. Результатом даного етапу є розробка плану випуску продукції, списків необхідних матеріалів та керуючих програм (КП) для обладнання з числовим програмним управлінням (ЧПУ). На цьому ж етапі враховуються специфічні вимоги, наприклад, проєктуються конструкції технологічного оснащення (затискачів, кріплень тощо). Технологічна підготовка подібна до підпроцесу синтезу у розробці, оскільки потребує значного досвіду та прийняття складних рішень. Тому, комп'ютеризація даного етапу є досить складною.

Після завершення підготовки, розпочинається виготовлення продукції, її перевірка на відповідність технічним вимогам. Контроль якості забезпечує відбір деталей для подальшого складання, тестування функціональності, пакування, маркування та відвантаження замовникам.

Описаний життєвий цикл продукту є типовим. При цьому, технології CAD, CAM та CAE застосовуються на різних етапах.

Як зазначалося, комп'ютери мають обмежене застосування у підпроцесі синтезу через труднощі обробки якісної інформації. Однак, розробник може використовувати комерційні бази даних для збору інформації, яка необхідна для аналізу здійсненності, а також каталоги для отримання додаткових даних.

Корисними є засоби параметричного та геометричного моделювання, а також програми для створення креслень у системах автоматизованого проєктування (computer-aided drafting), що є варіаціями систем CAD. Проте, потрібно розрізняти системи CAD та тривимірне моделювання. Так як тривимірне моделювання є частиною системи CAD, але також може існувати й окремо, що пов'язано із задачами, які вирішуються. Для отримання виробу необхідна конструкторська документація для передачі на виробництво, що і визначає специфіку такого програмного забезпечення (ПЗ). Однак, для задач тривимірного моделювання об'єктів з метою створення зображень, використовують ПЗ, яке працює безпосередньо з тривимірною моделлю. До складу такого ПЗ входять інструменти для роботи з моделлю, сценою, освітленням та матеріалами, що імітують поверхню, а також програми для отримання зображень зі сцени – «візуалізатори», або «рендери». Саме таке ПЗ й використовується для реалізації методу [14–17].

**Метою роботи** є розробка пропозицій щодо використання програмних пакетів тривимірного моделювання для швидкої та наближеної оцінки площі поверхонь літальних апаратів, що відбивають електромагнітне випромінювання для попередньої оцінки їх помітності у радіолокаційному діапазоні.

### Основний матеріал

Реалізація методу геометричної оптики виконується інструментами пакету тривимірного моделювання Blender 3D. Описаний метод оцінки радіолокаційних відображень реалізує всередині пакету тривимірного моделювання оптичний метод моделювання відображень без урахування фазових співвідношень. Подібне моделювання використовува-

лось одним з перших серед експериментальних методів, що дозволяло не лише проводити якісну оцінку відображень ЛА, а й кількісну.

Даний метод у своєму первісному вигляді мав ряд суттєвих недоліків, які нівелюються з використанням тривимірного моделювання [18]:

- необхідність поліровки моделі об'єкту, обклеювання відбиваючим матеріалом, що доволі трудомістко та має великі часові затрати;

- використання темної кімнати та обладнання для вимірювання інтенсивності відбиття світла від моделі об'єкту.

Дані недоліки для тривимірного моделювання не суттєві. Так як для сцени, що моделюється, можливо задати будь-які параметри заднього фону та матеріалу поверхні [12]. Представлений у роботі метод хоч і не є точним, проте, дозволяє досить швидко здійснювати первинну наближену оцінку ЕПР спираючись на підрахунок реальної площі поверхні направленої у сторону РЛС для ЛА складної форми. Даний метод найбільш адекватно працює для довжини хвилі значно меншої ніж геометричні розміри об'єкту [2]. Необхідність у сучасних засобах розробки ЛА, давно призвела до необхідності їх моделювання за допомогою САПР. Саме тому, модель ЛА на даний час завжди необхідна для виконання подальшого аналізу компонування, міцності тощо. Таку модель можливо використати для первинного аналізу поверхні для зниження радіолокаційної помітності. Для розробки запропонованого методу, попередньо, створено три моделі ЛА (літаків) за допомогою креслень та методів низько-полігонального моделювання. Перший – літак Л-39 (рис. 8).

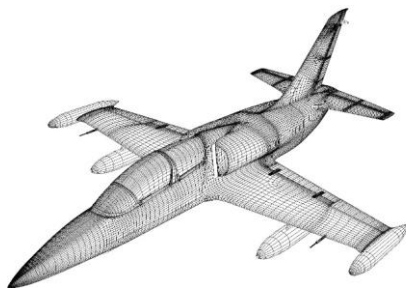


Рис. 8. 3d-модель літака Л-39

Другий – реальний літак який буде використовуватися для порівняння у подальшому: F-117 Night Hawk (рис. 9) – найбільш цікавий літак з точки зору випробування методу.

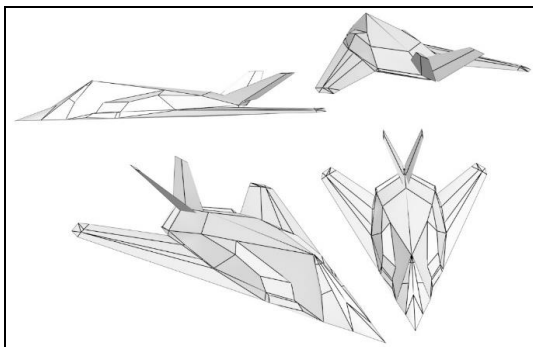


Рис. 9. 3d-модель літака F-117 Night Hawk

Так як модель даного літака має багато плоских поверхонь, то ЕПР для нього досить легко обчислює спеціалізоване ПЗ (СПЗ). Тому, його дані можливо використовувати для порівняння розробленого методу та сучасного СПЗ. Також, розроблено відносно просту модель, яка імітує типовий легкомоторний літак (рис. 10), яка не має прямих аналогів. На літаку розглянуто можливість дослідження рухомих деталей, таких як повітряний гвинт.

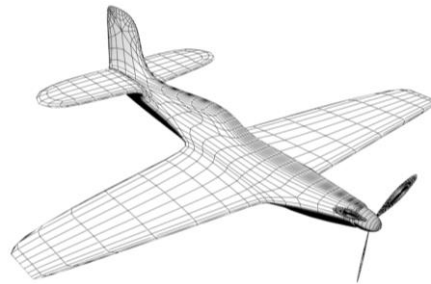


Рис. 10. 3d-модель легкомоторного літака

У роботі використане ПЗ, яке розроблене на мові програмування Python з бібліотеками для роботи з матрицями та зображеннями, а також пакет для тривимірного моделювання Blender 3D [6-9].

Суть методу полягає у тому, щоб помістити модель ЛА у спеціально налаштовану сцену та надати її поверхні дзеркальних властивостей. Сцена є віртуальною камерою та джерелом світла, що знаходяться на одній осі та рухаються по круговій траєкторії навколо ЛА, що поміщений у центр сцени.

Усі об'єкти у сцені мають реальний масштаб розмірів. Камера використовує ортогональну проекцію для побудови зображення. Вона знімає зображення моделі на абсолютно темному фоні із заданим кроком (у роботі застосовувався крок 1 градус). Послідовність зображень зберігається на жорсткий диск для подальшого аналізу. Аналіз може проводитись як візуально – по отриманим зображенням (для визначення яскравих точок на поверхні моделі), так і оброблятися за програмою.

Подальша обробка зображень проводиться програмно. Для визначення площі поверхні, що відбиває необхідно визначити одиничну площу пікселя. Для цього, в центрі тривимірної сцени, перпендикулярно до віртуальної камери, розташовується прямокутна ідеально відбиваюча площина (рис. 11). При цьому, об'єкт дослідження (літак) тимчасово приховують.

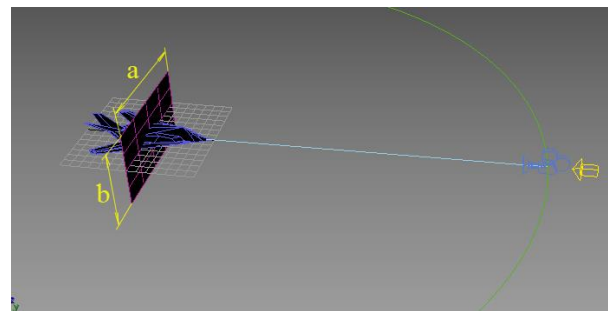


Рис. 11. – Розташування еталонної площини в сцені (літак показаний для правильного розташування площини)

Площина має розмір  $ab$ , при якому вона максимально займає поле зору віртуальної камери та не виходить за її межі (рис. 12).



**Рис. 12.** Розташування еталонної площини на готовому зображенні (площина займає видиму частину кадру, але не виходить за його межі)

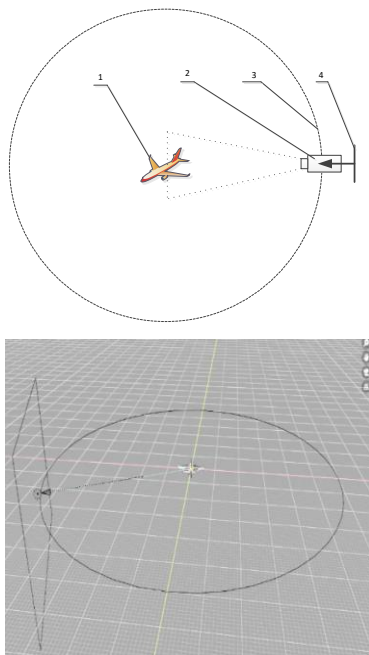
Нехай у межі зображення площини входить  $n$  пікселів тоді, площу одиничного пікселя можливо розрахувати наступним чином:

$$S_n = ab/n.$$

Використовуючи значення  $S_n$  та визначаючи кількість пікселів  $k$ , значення яскравості яких відмінне від нуля, можливо визначити загальну площу усїєї поверхні  $S_{zag}$ , яка відбиває сигнал у кожному ракурсі таким чином:

$$S_{zag} = S_n k.$$

Отже, можливо визначити фізичну площу поверхні ЛА, яка буде відбивати сигнал у напрямку приймача для кожного ракурсу (рис. 13).



**Рис. 13.** Схема сцени для проведення дослідження відбиваючої здатності та її вигляд у Blender 3D: 1 – ЛА, що досліджується; 2 – віртуальна камера; 3 – траєкторія руху камери навколо ЛА; 4 – джерело паралельного потоку променів на одній осі з віртуальною камерою (рухається разом з віртуальною камерою)

Зробивши знімки по колу з кроком у один градус можливо отримати набір ракурсів у вигляді зображень (рис. 14, 15).



**Рис. 14.** Зразок декількох отриманих ракурсів ЛА (3D модель літака Л-39 без урахування радіопрозорості носового обтікача та кабіни)

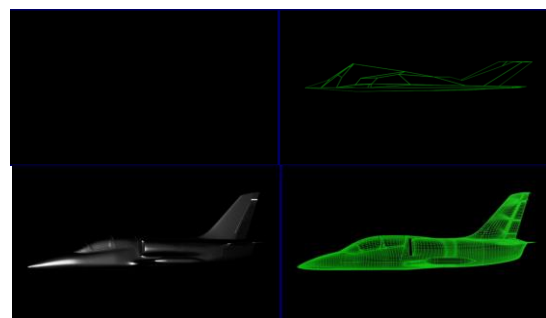


**Рис. 15.** Зразок декількох отриманих ракурсів об'єкта (3d модель легкомоторного літака)

Щоб обчислити площу для кожного з них написано ПЗ на мові програмування Python. ПЗ обчислює площу для кожного ракурсу, створює масив даних та будує на їх основі графік у полярних координатах.

Таким чином, можливо побачити найбільш активно відбиваючі поверхні. Округлі форми є досить не вигідними з точки зору радіолокаційної помітності тому, що у округлих об'єктів завжди є область, яка буде перпендикулярна до напрямку опромінення, а з іншого боку – плоскі та гострі форми, що розташовані таким чином, щоб відбивати сигнал у будь-який бік, окрім радіолокатора, можуть значно знизити відсоток сигналу, що повертається назад.

Як відомо – гострі кромки з великою лінійною довжиною відносно довжини хвилі вносять мінімальний вклад у ЕПР [1, 19]. На рис. 16 наведені тривимірні моделі двох літаків. Для розуміння ракурсу – з іншого боку показана полігональна сітка тривимірної моделі. Отже, модель F-117 Night Hawk нічого не повертає назад з такого ракурсу, а, у свою чергу, випуклі, округлі форми Л-39 відбивають (повертають) багато сигналу назад.



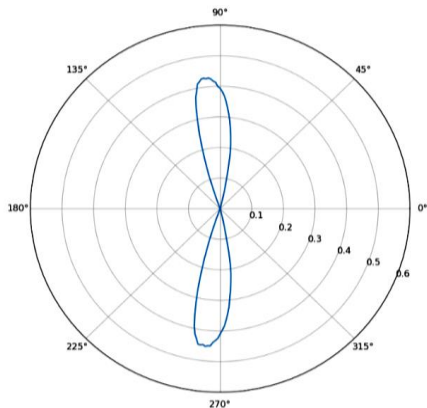
**Рис. 16.** Вплив форми на властивості відбиття сигналу

Приведені моделі у рамках розробленого методу розглядаються виключно як ідеально відбиваючі поверхні.

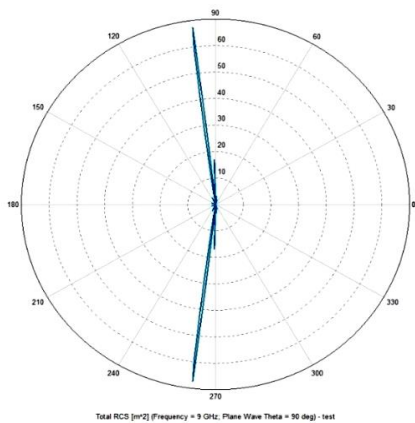
Проте, є можливість імітувати прозорі, частково прозорі та поглинаючі матеріали без прив'язки до реальних фізичних властивостей матеріалу.

*Аналіз отриманих результатів у процесі моделювання.* Для перевірки роботи методу одну й ту ж саму модель F-117 Night Hawk поміщено у тривимірну сцену та у СПЗ Altair ФЕКО для зняття кругової діаграми ЕПР. Отримані результати корелюють один

з одним за кутами найбільшого значення ЕПР (рис. 17). Проте, за отриманими значеннями різниця досить велика, це пов'язано з тим, що метод визначає не ЕПР, а саме площу поверхні, що здатна повернути сигнал назад у точку, з якої його було випущено.



а – застосування запропонованого методу, м<sup>2</sup>



б – розрахунок ЕПР в спеціалізованому програмному пакеті Altair FEKO, м<sup>2</sup>

Рис. 17. Результати, отримані для моделі F-117 Night Hawk

На відміну від реальної ЕПР у методі не враховуються такі явища, як інтерференція та резонанс. Однак, запропонований метод працює значно швидше, ніж розрахунок СПЗ.

Однією з переваг методу є можливість проаналізувати зображення на наявність проблемних ділянок на відміну від Altair FEKO, де діаграма спрямованості, навіть з відображеною разом з нею 3D-моделлю, не дає розуміння, яка частина поверхні ЛА є проблемною (рис. 18) [20].

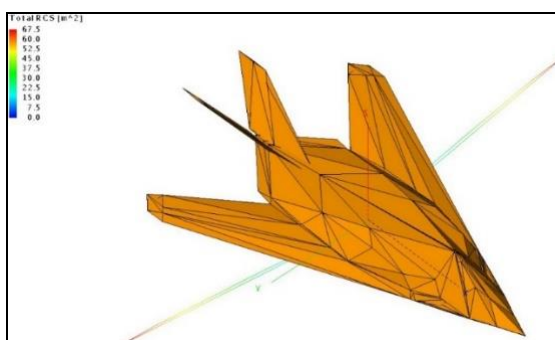


Рис. 18. Накладення тривимірної моделі на графік її ЕПР в Altair FEKO

При використанні запропонованого методу є можливість відстежити проблемні місця. Для цього необхідно визначити кут, під яким спостерігається найбільша площа відбиття та знайти відповідний за номером кадр у цьому куті. У даному випадку отримані кути 94° та 266° – тобто 94 та 266 кадр, відповідно. Можливо знайти кадр у послідовності та ретельно дослідити його (рис. 19).

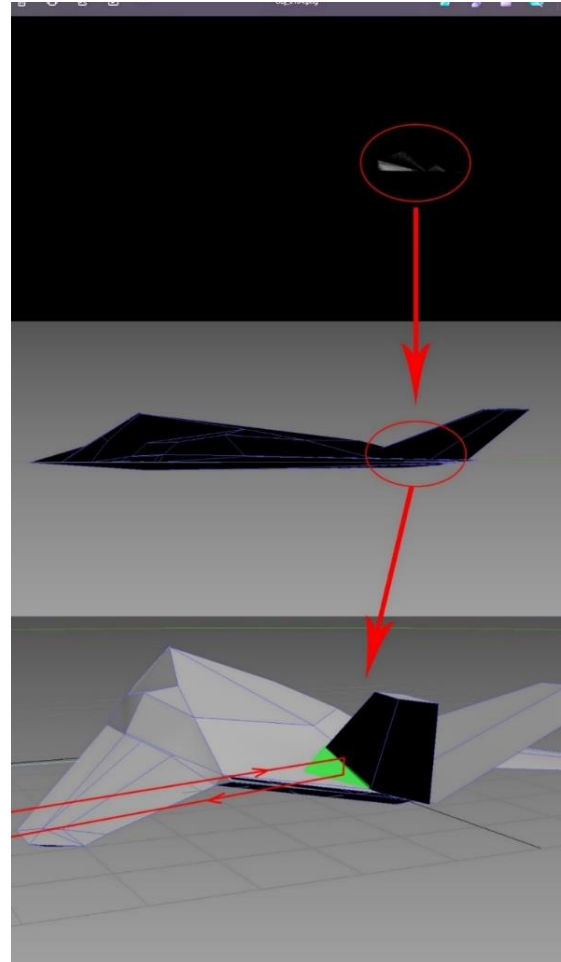


Рис. 19. Послідовність визначення проблемної ділянки на моделі, яка робить значний внесок в ЕПР

Спираючись на 3D-модель та знайдений кадр, можливо локалізувати область відбиття сигналу. У даному випадку найбільш проблемним є місце стику фюзеляжу та V-подібного оперення. Причина, за якою у даному ракурсі є відбиття, може критися як у недосконалості форми 3D-моделі, яка не повністю відповідає реальному прототипу. Так, й можливості виконання оперення з композиційних радіопоглинаючих або радіопрозорих матеріалів, що не враховано під час моделювання.

Дане рішення могло бути компромісним під час проектування F-117 Night Hawk тому, що керування у схемі безхвостка мало вивчено та вважалося складним [21]. Для порівняння можливо побачити, яку максимальну площу відбиваючої поверхні має літак Л-39 (рис. 20). На графіку (рис. 20) максимальна площа складає близько 12 м<sup>2</sup>. При цьому, модель літака досить детальна та має велику кількість полігонів, що для моделювання у Altair FEKO

вимагало б побудови еквівалентної моделі з меншою кількістю деталей для можливості обчислення.

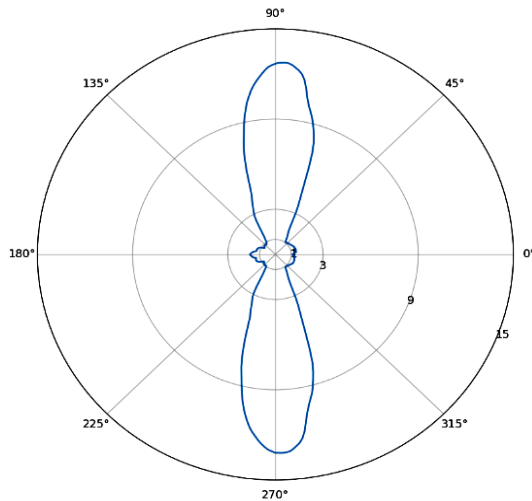


Рис. 20. Результати, отримані для моделі Л-39, м<sup>2</sup>

### Висновки

Таким чином, розроблено пропозиції щодо використання програмних пакетів тривимірного моделювання для швидкої та наближеної оцінки площі поверхонь ЛА, що відбивають електромагнітне випромінювання для попередньої оцінки їх помітності у радіолокаційному діапазоні. Такий підхід дозволяє швидко на перших етапах проектування визначити форму ЛА залежно від потреб та доопрацювати її вже більш точними методами, що значно заощадить час на проектування.

Основними перевагами використання програмних пакетів тривимірного моделювання є:

- проста, візуальна інтерпретація отриманих результатів – можливість перегляду отриманих ракурсів відбиття для моделі ЛА (літака);

- швидка робота – швидкість отримання результату по тривимірній моделі літака аналогічної складності іншими методами займає значно більше часу. Використання сучасних відеокарт комп'ютера та алгоритмів трасування променів дозволяє проводити дослідження у реальному масштабі часу;

- можливість імітації складної конструкції літака з урахуванням радіопоглинаючих та радіопрозорих матеріалів, а не тільки поверхні з ідеальною провідністю;

- можливість анімації різних частин конструкції літака таких, як: відкриття різноманітних люків, випуск шасі тощо, що дозволить дослідити рухомі частини конструкції.

Розроблений метод може бути використаний для проектування перспективних літаків та безпілотних літальних апаратів з урахуванням малопомітності.

При цьому, розроблений підхід не замінить значно точніші методи, які засновані на вирішенні інтегральних рівнянь електричного та магнітних полів на поверхні радіолокаційного об'єкта складної форми.

Однак, може доповнити їх та стати інструментом для швидкої оцінки форми ЛА з точки зору відбивної здатності, а також на етапі розробки – попередньо доопрацювати форму перспективного ЛА.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sukharevsky, O. & Vasilets, V. (2024). Scattering Characteristics of Aerial and Ground Radar Objects. CRC Press. 530 p., doi: <http://dx.doi.org/10.1201/9781032676425>
2. Сухаревський О. І., Василюк В. О., Нечитайло С. В., Резніченко О. А., Кудряшов Г. В. (2023). Дослідження радіолокаційних характеристик моделі баражуючого боєприпасу "Shahed-136". *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, № 2 (51), С. 56-62, doi: <https://doi.org/10.30748/nitps.2023.51.07>
3. Diaz V. & Torres J. M. G. (2012). Analysis of radar cross section assessment methods and parameters affecting it for surface ships. *Ciencia y tecnología de buques*, 6(11), pp. 91-106, doi: <http://dx.doi.org/10.25043/19098642.72>
4. Наконечний, В. С., Присяжний, А. Е., Побережний, А. А. (2005) Електродинамічне моделювання з використанням безлунних камер НВЧ. Методика оцінювання коефіцієнта безлунності. *Системи обробки інформації*. № 9(49), С. 116–123, URL: <https://core.ac.uk/download/232885938.pdf>
5. Гніденко, І. А., Воробйов, І. С. (2016). Аналіз сучасних продуктів 3D-моделювання, можливості їх застосування в навчальному процесі. *Проблеми інформатизації та управління*. Збірник наукових праць Національного авіаційного університету, Том 3, 55, С. 25–28, doi: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.3.11317>
6. IMAGEIO, URL: <https://github.com/imageio/imageio/> (дата звернення 16.07.2025).
7. NumPy, URL: <https://numpy.org/> (дата звернення 16.07.2025).
8. Matplotlib: Visualization with Python, URL: <https://matplotlib.org/> (дата звернення 16.07.2025).
9. Blender3D, URL: <https://www.blender.org/> (дата звернення 16.07.2025).
10. Hendriyani Y. & Amrizal V. A. (2019) The comparison between 3D studio max and blender based on software qualities. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1387:012030, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1387/1/012030>
11. Caudron, R. & Nicq, P. A. (2015). Blender 3D By Example: Design a complete workflow with Blender to create stunning 3D scenes and films step-by-step! Packt Publishing Ltd., 334 p., URL: <https://www.amazon.com/Blender-3D-Example-Romain-Caudron/dp/1785285076>
12. Kent, B. R. (2015). 3D scientific visualization with Blender®. Morgan & Claypool Publishers, 90 p., doi: <http://dx.doi.org/10.1088/978-1-6270-5612-0>
13. Shah, F.A., Qazi, A.A., Khan, A.S. & Farooq, M.U. (2023). Challenges and Opportunities in Tailless Aircraft Stability and Control. National University of Sciences & Technology (Preprint), 15 September 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.29321.42085. URL: [https://www.researchgate.net/publication/373925686\\_Challenges\\_and\\_Opportunities\\_in\\_Tailless\\_Aircraft\\_Stability\\_and\\_Control](https://www.researchgate.net/publication/373925686_Challenges_and_Opportunities_in_Tailless_Aircraft_Stability_and_Control)
14. Tickoo, S. (2018). MAXON CINEMA 4D R19 Studio: A Tutorial Approach. CAD/CIM Technologies, 396 p., UDL: <https://www.amazon.com/MAXON-CINEMA-4D-R19-Studio/dp/1640570217>
15. Tickoo, S. (2018). Autodesk Maya 2019: A Comprehensive Guide. Cadcim Technologies. 608 p., URL: <https://www.cadcim.com/autodesk-maya-2019-a-comprehensive-guide>

16. Park, J. E. (2007). Understanding 3D animation using Maya. Springer Science & Business Media. 344 p., URL: <https://www.amazon.com/Understanding-3D-Animation-Using-Maya/dp/038700176X>
17. Stroud, I., & Nagy, H. (2011). Solid modelling and CAD systems: how to survive a CAD system. Springer Science & Business Media. 689 p., URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-85729-259-9>
18. Corbel, C., Bourlier, C., Pinel, N. & Chauveau, J. (2013). Rough surface RCS measurements and simulations using the physical optics approximation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(10), pp. 5155-5165, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TAP.2013.2265253>
19. Sun, H. & Qin, Y. (2022). Stealthy Configuration Optimization Design and RCS Characteristics Study of Microsatellite. *Aerospace*, 9(12):815, doi: <http://dx.doi.org/10.3390/aerospace9120815>
20. Shi-Gang, Z., Hai-Tao, M., Jie, M. & Jian-Ying, L. (2024). A Generalized RCS Definition and Its Application. *2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI)*, pp. 1315-1316, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/AP-S/INC-USNC-URSI52054.2024.10686945>
21. Bera, S., Sur, S. N., Singh, A. K. & Bera, R. (2024). RCS measurement and ISAR imaging radar in VHF/UHF radio channels. *Int. Journal of Remote Sensing*, 45(7), pp. 2159-2181, doi: <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2024.2326533>
22. Ullah, M. U., Latef, T. B. A., Othman, M., Hussein, M. I., Alkhoodri, H. M., Yamada, Y., Kamardin K. & Khalid, R. (2024). A progression in the techniques of reducing RCS for the targets. *Alexandria Engineering Journal*, 100, 153-169. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.001>

Received (Надійшла) 25.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.09.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Толкаченко Євгеній Анатолійович** – доктор філософії, старший викладач, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна;

**Yevhenii Tolkachenko** – PhD, Senior Lecturer of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: [tolkach\\_g@ukr.net](mailto:tolkach_g@ukr.net); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3736-2606>.

**Коломіїцев Олексій Володимирович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

**Oleksii Kolomiitsev** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: [Oleksii.Kolomiitsev@khp.edu.ua](mailto:Oleksii.Kolomiitsev@khp.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-8228-8404>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57211278112>.

**Осієвський Сергій Валерійович** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна;

**Serhii Osiievskiy** – PhD, associate professor, Senior Lecturer of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: [Stiv161272@gmail.com](mailto:Stiv161272@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-0861-9417>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57201773605>

**Самокіш Артем Валерійович** – доктор філософії, старший викладач, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна;

**Samokish Artem** – PhD, Senior Lecturer of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: [samokishartem@gmail.com](mailto:samokishartem@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-1924-9351>.

**Панченко Володимир Іванович** – старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

**Volodymyr Panchenko** – Senior Lecturer of the Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: [Volodymyr.Panchenko@khp.edu.ua](mailto:Volodymyr.Panchenko@khp.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3364-3398>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58759071400>.

**Proposals for the estimating the reflective surface area of aircraft  
based on three-dimensional modeling software packages**

Yevhenii Tolkachenko, Oleksii Kolomiitsev, Serhii Osiievskiy, Artem Samokish, Volodymyr Panchenko

**Abstract. Relevance.** The development of military aircraft, both unmanned and manned, faces an acute challenge to reduce their radar visibility. There are sophisticated software products that can calculate the effective scattering surface of an aircraft of any shape with great accuracy. However, they are united by the demand on computing resources when modeling a radio signal reflected from a complex aircraft shape. Such demandingness leads to large time costs when it is necessary to iteratively change the shape of the aircraft. **Object of research:** the process of estimating the effective scattering surface of aircraft using three-dimensional modeling. **Purpose:** development of proposals for the use of three-dimensional modeling software packages for quick and approximate estimation of the area of aircraft surfaces that reflect electromagnetic radiation for a preliminary assessment of their visibility in the radar range. **Research results.** To reduce the cost of computing resources and quickly estimate the surface area of aircraft, its simplified form of the model is used, which reduces the accuracy of calculations. The paper substantiates the use of three-dimensional modeling packages, for example, Blender 3D, an open source software, to study radar reflection from an aircraft model, based on the methods and assumptions of geometric optics. **Conclusions.** The use of three-dimensional modeling packages for preliminary and rapid acquisition of the aircraft shape is relevant at the preliminary design stage. The use of various surface shaders for a three-dimensional aircraft model is necessary to simulate the refraction, reflection, and absorption of radio waves.

**Keywords:** aircraft, mathematical modeling method, computer modeling, programming, range portrait, optical method.

A. Huk, V. Diachenko, M. Illarionov, Y. Titova

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

## CONTROL MODELS FOR MOBILE ROBOT PARKING USING DISTANCE SENSOR DATA

**Abstract. Relevance.** The growing demand for autonomous mobile systems capable of independent navigation and parking is driven by several critical factors. Firstly, the rapid robotization in logistics, security, delivery, and service industries necessitates reliable mechanisms for precise positioning of mobile platforms in spatially constrained environments. Secondly, in the context of autonomous vehicle development, the issue of automatic parking becomes a priority for enhancing safety, reducing energy consumption, and minimizing human involvement in control processes. Currently, a significant number of studies focus on the implementation of automatic parking systems; however, most of them either rely on high-cost sensors (such as LiDARs or deep-learning-based cameras) or fail to ensure the required accuracy under dynamic or unfamiliar environmental conditions. Against this backdrop, the use of ultrasonic sensors represents an effective alternative, enabling a necessary level of adaptability and sensitivity while maintaining low system cost. The relevance of this research is further reinforced by the need to develop a universal control model that is scalable, adaptive, and easily integrable into various types of mobile platforms. This work focuses not only on the theoretical formulation of the control model but also on its experimental validation using data from ultrasonic sensors that reflect the physical environment in real time. Therefore, the development of a mobile robot parking control model based on ultrasonic sensors is a timely and important task that combines scientific novelty with practical significance for the advancement of autonomous systems. **The object of research.** A parking control system for a mobile robot that operates based on data obtained from ultrasonic distance sensors. This system comprises both hardware components, such as ultrasonic sensors, actuators, and controllers, and software that implements algorithms for environmental analysis, decision-making related to parking maneuvers, and motion control. **Purpose of the article.** This article presents a comprehensive review of contemporary models for mobile robot parking control based on distance sensor data. The objective is to identify and critically evaluate effective approaches to sensor integration, control algorithm design, and architectural implementation of such systems. Particular attention is given to analyzing their applicability in real-world environments, with the aim of outlining development prospects that enhance system accuracy, reliability, and adaptability under dynamic and constrained conditions. **Research results.** As a result of the conducted review, it has been established that modern mobile robot parking control systems encompass a wide range of modeling approaches, varying in both mathematical complexity and sensor configurations. The analysis reveals that the choice of control model is directly influenced by the availability of computational resources, the robot's chassis type, and the nature of the operational environment. Particular attention is given to the comparative assessment of sensors, with ultrasonic sensors remaining dominant in short-range positioning systems due to their low cost, ease of integration, and reliability in controlled conditions. Conversely, LiDAR sensors have demonstrated superior accuracy and spatial resolution, although they present higher implementation and maintenance complexity. Cameras and infrared sensors are regarded as supplementary data sources, functioning effectively only within well-defined conditions and with appropriate software support. The findings of the review confirm that an effective parking control system for mobile robots relies on a holistic approach that integrates sensor selection, control model design, algorithmic implementation, and system architecture. Such integration enables high accuracy and operational reliability even in complex, dynamic, or constrained environments. **Conclusions.** Effective mobile robot parking control is based on the integration of reliable sensor systems, particularly ultrasonic sensors and adaptive decision-making algorithms. Ultrasonic sensors remain the most suitable option for low-cost and simple systems, whereas hybrid approaches involving LiDAR or camera-based solutions offer higher precision. Among the control algorithms, finite state machines, fuzzy logic, and machine learning methods have demonstrated the greatest effectiveness. The most optimal system architecture is modular, with a clear separation between sensing, computation, and actuation layers, which ensures adaptability, accuracy, and operational stability under real-world conditions.

**Keywords:** mobile robot, autonomous parking, ultrasonic sensors, sensor system, decision-making algorithms, finite state machine, fuzzy logic, machine learning, motion control, navigation system.

### Introduction

In the context of rapid advancements in autonomous mobility, the issue of efficient parking control for mobile robots has become increasingly relevant. Across multiple industries – from warehouse logistics to autonomous vehicles – robotic platforms must not only navigate through environments but also independently execute precise parking maneuvers in confined spaces. The ability to perform automated parking is a critical component of full autonomy and a key factor for the safe and efficient operation of such systems.

One of the most promising approaches to solving this problem involves the use of real-time sensory data,

particularly from ultrasonic distance sensors. These sensors offer a simple, low-cost, and reliable means of detecting obstacles and measuring distances to them, enabling the implementation of adaptive maneuvering algorithms. The primary challenge lies in developing an appropriate mathematical model and a software-hardware implementation that can effectively interpret sensor signals and use them to execute precise motion control commands.

This paper presents an approach to developing a parking control model for a mobile robot based on ultrasonic sensors, along with results from experimental evaluations of the system's performance in both simulated and real-world conditions.

**Review of recent studies and publications.** Contemporary research in mobile robot control demonstrates a growing interest in low-cost and reliable sensor solutions, such as ultrasonic sensors, to support accurate positioning, obstacle detection, and autonomous parking functionality. The reviewed academic sources cover a range of approaches to sensor integration, algorithmic control, and the evaluation of autonomous navigation system accuracy. The first two references are particularly foundational, as they systematize key methods and examine the potential of ultrasonic systems in real-world applications, especially in environments with spatial or resource constraints.

In [1], the authors analyze modern sensor systems used for obstacle detection in mobile robotics. The study focuses on comparing ultrasonic sensors, LiDAR, infrared sensors, and cameras. Ultrasonic sensors are identified as the most effective for short-range navigation, especially when computational resources or budget are limited. The authors conclude that ultrasonic sensors offer the lowest energy consumption and cost, and high indoor reliability, but can be affected by surfaces that strongly absorb sound. The review in [2] explores a broad range of applications for ultrasonic sensors, including robotics, automotive ADAS systems, security systems, and smart cities. In the context of robotics and autonomous parking, ultrasonic sensors are highlighted as the best solution for short-distance measurement and object detection. The study also notes that combining them with other sensors (infrared, magnetic, cameras) significantly improves system stability and adaptability in complex environments. Studies [3] and [4] focus on emerging technologies that enhance traditional applications of ultrasonic sensors in mobile robotics, particularly in the domain of autonomous parking. These works highlight the transition from simple two-dimensional systems to volumetric sensing approaches, which open new possibilities for achieving full autonomy in real-world-like environments. Study [3] addresses a new generation of ultrasonic sensors designed to provide three-dimensional coverage of the space surrounding a mobile robot. Specifically, it explores Acoustic Detection and Ranging (ADAR) systems, which enable 360-degree spatial perception without the need for rotating mechanisms or complex optical setups. One of the key advantages of these sensors lies in their significantly lower cost compared to traditional LiDAR solutions: a single ADAR module is priced at approximately \$1,000, whereas a conventional 2D LiDAR system may cost \$4,000 or more. In addition to affordability, the authors emphasize safety advancements – ADAR sensors are certified under IEC 61508 (SIL2), making them suitable for use in industrial and commercial autonomous platforms. The experimental section presents results of implementing ADAR sensors in an autonomous mobile device with a fully integrated obstacle-avoidance system during parking maneuvers. Even in conditions involving irregularly reflective surfaces, the sensor demonstrated stable performance, whereas conventional ultrasonic modules with single-plane detection suffered from accuracy loss or false positives. This publication, therefore, underlines the relevance of transitioning toward multi-

angle ultrasonic arrays or volumetric solutions for autonomous parking applications in mobile platforms.

Study [4] has a practical focus and provides technical insights into ADAR system design for mobile robot developers. It presents the advantages of a new acoustic radar architecture that relies not on the classic conical emission diagram, but on analytical reconstruction of the acoustic wave in space. By minimizing mechanical components and increasing the data refresh rate (up to 100 Hz in scanning mode), the system significantly improves obstacle detection stability during rapid maneuvers. The authors also emphasize the economic impact: a configuration using four ADAR modules effectively replaces two full-scale LiDAR units, resulting in an overall cost reduction of 60–80%. Practical examples include configurations for logistics-class robots, where the parking system operates based on a 3D ultrasonic map of the environment. Unlike traditional systems that require prior map alignment, the new system performs local spatial reconstruction and does not rely on external references. Consequently, this publication not only confirms the potential of 3D ultrasonic sensors but also serves as a technical foundation for their integration into next-generation mobile robot parking control solutions.

In [5], the authors propose a fundamentally novel approach to sensor integration: instead of mounting ultrasonic sensors on the robot body or masts, the sensing elements are embedded directly into the wheels of the mobile platform. This configuration creates an acoustic canalization system that combines contact-based and contactless sensitivity. The paper presents a technical description of the sensor architecture: a piezoelectric element embedded in the wheel rim generates acoustic waves that propagate through the tire and reflect from the surface with which the wheel makes contact. By analyzing the acoustic response, the system can determine the type of surface, detect micro-obstacles, and even localize the initial point of contact with a wall or other object. Experimental results demonstrate that the robot was able to accurately detect changes in ground material without the assistance of cameras or conventional sensors. This opens new prospects for parking systems operating under low-light, dusty, or confined conditions, where ultrasonic reflection from walls offers advantages over optical systems. The authors emphasize that such tactile ultrasonic sensing could serve as a backup system for registering real contact with obstacles during parking maneuvers, significantly reducing the risk of mechanical damage to the platform.

In [6], the authors investigate the deployment of multiple ultrasonic localization systems in a single environment without prior calibration. A common challenge for autonomous robots relying on ultrasonic beacons is the need for precise manual placement and calibration of those beacons. In response, the authors propose the SCAN algorithm, which enables a robot to simultaneously build an environmental map and automatically calibrate beacon positions based solely on signals received from the ultrasonic sources. To process signals and estimate position, the study employs Extended Kalman Filters (EKF), Weighted Least Squares Error filters, and Unscented Kalman Filters (UKF). A series of indoor experiments using a TurtleBot platform demonstrated that

the SCAN approach reduces localization error by half compared to traditional ULPS without self-calibration. In the context of parking, this system enables the mobile robot to adaptively orient itself even in environments with dynamic spatial configurations – such as temporarily relocated or occluded beacons – which is especially valuable in settings like warehouses, parking areas, or logistics hubs. In [7], the authors present an IoT-based parking system that integrates various sensors (IR, ultrasonic, DHT22, MQ-2), an OLED display, and a mobile application connected via MQTT. The system provides real-time monitoring of parking slot availability and supports automation features.

The reviewed publications illustrate current trends in the development of sensor systems and control algorithms for mobile robots in the context of autonomous parking. The combination of traditional ultrasonic sensing principles with novel architectural and algorithmic approaches significantly extends the capabilities of autonomous parking, enhances system adaptability, and brings mobile robots closer to fully independent operation in complex and dynamic environments.

**The purpose of this work** is to generalize, systematically analyze, and critically evaluate contemporary approaches to the design of mobile robot parking control systems based on distance sensor data. Special attention is given to the comparison of sensor configurations, control model types, decision-making algorithms, and system architectures, with the aim of identifying their advantages, limitations, and potential for practical implementation in real-world environments.

### Main part

In contemporary scientific and technical literature, several principal approaches have emerged for developing models of parking control for mobile robots. These approaches differ in terms of the level of mathematical formalization, the type of input data used, algorithmic structures, and adaptation to specific technical conditions such as chassis configuration, environmental characteristics, and sensor types. Despite their differences, all methods share a common objective: to ensure stable, accurate, and safe insertion of the robot into a predefined parking position within a constrained and obstacle-filled environment.

One of the most prominent categories includes kinematic models with feedback control. These models describe the motion of the mobile robot using differential equations that account for orientation and velocity. Based on a typical model (e.g.,  $x = \cos(x)$ ,  $y = \sin(x)$ ,  $\theta = w$ ) a controller (proportional, fuzzy, model predictive control, or neural network-based) adjusts the robot's trajectory by computing the deviation from the desired parking pose. This method offers mathematical precision but is sensitive to sensor noise and irregular parking area geometry.

Another widely used approach is the motion-pattern-based model. In this case, predefined maneuver templates – such as arcs, reverse curves, or pivot turns – are selected based on the geometric layout derived from sensor input. This method is especially suitable for low-computation environments or systems with limited degrees of freedom.

Trajectory-planning algorithms represent a third class of models, where the robot's path is generated using search-based techniques such as A\*, D\*, RRT, Hybrid A\*, or their heuristic-enhanced variants. These methods operate in either coordinate space or configuration space, accounting for kinematic constraints, and enable the construction of smooth, optimal, or safe paths in complex environments. However, they often require considerable computational resources.

Decision-making in uncertain or noisy environments is frequently addressed through fuzzy logic, where behavior is governed by a set of “if-then” rules. While highly adaptive and robust to incomplete data, such systems are less amenable to formal optimization.

An increasingly popular direction involves deep learning-based methods, where the robot's behavior is trained on large datasets. These include neural networks for situation classification, regression models for coordinate estimation, and reinforcement learning for acquiring parking maneuvers through trial and error. Hybrid models aim to combine the strengths of the above techniques – for example, initiating entry with motion templates and refining the final trajectory using A\* planning or fuzzy controllers. The choice of a suitable parking control model for a mobile robot largely depends on the platform type, environmental complexity, required precision, reaction time constraints, and available sensor data. Ultrasonic sensors, although limited in spatial resolution, enable effective implementation of adaptive or fuzzy control strategies under constrained computational budgets. Next, we turn to the comparative analysis of sensors used for autonomous parking of mobile robots. Sensor selection plays a critical role in obstacle detection, spatial awareness, and accurate environmental mapping. The most common types in such systems are ultrasonic sensors, infrared sensors, LiDAR, and cameras – each with distinct advantages, limitations, and performance characteristics that directly impact overall system accuracy and reliability.

Ultrasonic sensors operate by measuring the time-of-flight of acoustic waves reflected from surrounding objects. They perform well for short-range obstacle detection, offering low cost, ease of integration, and stable performance in indoor environments. Ultrasonic systems are less affected by lighting conditions, making them reliable for shaded or enclosed spaces. However, their accuracy is limited, particularly when detecting soft or angled surfaces that absorb or scatter the sound waves. They also have a wide field of view, which complicates precise localization and may cause false positives due to multipath reflections in cluttered environments.

Infrared sensors, which detect reflected or absorbed thermal radiation, offer high accuracy at very short ranges. They are suitable for detecting nearby objects or edges, but their performance degrades under variable lighting or when interacting with materials that poorly reflect IR radiation (e.g., glass, dark, or shiny surfaces). As a result, IR sensors are rarely used as primary components in complex parking systems but may serve as auxiliary sources of localized information.

LiDAR systems provide significantly higher distance-measurement precision using laser beams to con-

struct point clouds of the environment. They can capture detailed 2D or 3D models, making them indispensable in autonomous vehicles and robots operating in dynamic or unstructured environments. However, LiDAR is expensive, energy-intensive, and requires advanced data processing. Moreover, performance may be affected by adverse weather, dust, moisture, or glass surfaces, which scatter or attenuate the laser signal.

Camera systems, including RGB, stereo, or depth cameras, offer the most versatile means of environmental perception. They capture object contours and colors while enabling scene interpretation, marker recognition, spatial estimation, and object classification. When combined with computer vision or deep learning algorithms, cameras become powerful tools for navigation. Nevertheless, their range estimation is limited without specialized processing (e.g., stereo vision), and they are highly sensitive to lighting conditions. Poor illumination, glare, backlighting, or shadows can degrade image quality and compromise algorithmic performance.

Sensor Type	Ultrasonic	Infrared	LiDAR	Camera
Operating Principle	Sound wave reflection	Infrared light reflection	Laser scanning	Image processing
Range (m)	0.02–3	0.01–0.8	0.1–100+	0.5–10+
Accuracy	Low–Medium	High (short range)	High	Medium–High
Resistance to Interference	High (indoors)	Low	Medium	Low–Medium
Cost	Low	Very low	High	Medium
Suitability for Parking	Good	Limited	Excellent	Excellent (hybrid use)

Fig. 1. Comparative analysis of sensors

Fig. 1 presents a comparative table of four types of sensors commonly employed in mobile robot parking systems. It summarizes the key technical characteristics of ultrasonic, infrared, LiDAR sensors, and visual cameras, focusing on parameters that influence system accuracy, stability, and operational efficiency.

Each sensor type demonstrates specific strengths and is most effective under operating conditions. Ultrasonic sensors are optimal for basic parking tasks in enclosed or structured environments. Infrared sensors are well-suited for short-range object detection and can serve as auxiliary detectors. LiDAR offers the highest spatial resolution, but its use is justified primarily in resource-intensive systems capable of advanced data processing. Cameras provide the most comprehensive scene understanding but are highly sensitive to environmental factors and computational demands. In practice, hybrid sensor configurations – combining multiple modalities – prove to be the most effective, as they allow compensation for individual sensor limitations and enable system adaptability in dynamic or complex environments.

The classification of decision-making algorithms used in mobile robot parking systems constitutes an important analytical task. It allows researchers to evaluate how sensor input, particularly distance measurements, is transformed into specific actuator commands and to assess the adaptability of each approach to different environmental conditions. Based on complexity, adaptability, and logical structure, decision-making algorithms can be categorized into several conceptual types.

One of the simplest yet most widely adopted approaches is the rule-based system. In this case, the robot's behavior is described through predefined condi-

tional statements, such as: “if the front distance is  $< 30$  cm, then stop; if the right sensor detects free space, then initiate a right turn.” These systems are easy to implement and computationally inexpensive, but they offer limited flexibility and perform poorly in unpredictable scenarios.

A more structured approach is the finite state machine (FSM), in which the parking process is divided into discrete states, each associated with specific transition conditions based on sensor data. FSM-based systems enable the development of logically structured, stable, and predictable algorithms. However, their scalability is limited, as the number of states and transitions increases exponentially with scenario complexity.

Fuzzy logic systems offer a more adaptive approach by formulating rules with linguistic variables and fuzzy sets, rather than strict numerical thresholds. For instance: “if the distance ahead is short and the left distance is moderate, then gently steer right.” Such systems provide flexible responses to sensor input and perform well under conditions with high measurement noise. However, they require manual tuning of membership functions and rule validation, which can be complex and time-consuming.

A contemporary trend in decision-making for robotic systems is the use of machine learning methods [8], including deep neural networks and reinforcement learning algorithms. These models learn decision-making strategies from extensive datasets or through environmental interaction. They can recognize spatial patterns, evaluate the suitability of parking spots, and predict optimal maneuvers based on historical experience. Their advantages lie in generalization capabilities and adaptability to novel situations. Nevertheless, they demand large training datasets, significant computational power, and often lack interpretability compared to traditional logic-based systems.

Hybrid approaches are increasingly adopted to combine the advantages of different paradigms. For example, rule-based logic may be used to govern safety-critical behaviors, while machine learning components handle adaptive planning. Alternatively, FSMs may incorporate fuzzy control modules within individual states. Such integration ensures both stability and predictability while enhancing flexibility and the capacity for autonomous learning.

Fig. 2 presents a table of effectiveness criteria for mobile robot parking control systems. It summarizes four key parameters used to evaluate the performance quality of such systems. Positioning accuracy is measured as the deviation from the target parking location, with deviations under 5 cm considered indicative of high-precision platforms. Energy consumption refers to the power used per parking maneuver, where values below 10 W are acceptable for battery-powered robots. Adaptability reflects the system's ability to respond to changing environmental conditions – an especially critical requirement in hybrid systems operating in dynamic or unpredictable spaces. Response time denotes how quickly the system initiates action following a command trigger, with values under 2 seconds deemed suitable for real-time operation.

Criterion	Evaluation Method	Typical Values	Relevant System Types
Positioning Accuracy	Distance to parking target	< 5 cm deviation	High-precision robots
Energy Consumption	Power usage per maneuver	< 10 W per task	Battery-powered platforms
Adaptability	Ability to handle environment changes	High in hybrid systems	Dynamic environments
Response Time	Time from trigger to action	< 2 s transition	Real-time systems

**Fig. 2.** A table of effectiveness criteria for mobile robot parking control systems

The classification of decision-making algorithms illustrates the evolution from simple logical constructs to intelligent, adaptive systems. Each approach occupies its own niche of effectiveness, and the selection of an appropriate algorithm depends on the complexity of the operating environment, the types of available sensors, computational capabilities, and the reliability requirements of the parking control system.

Another critical aspect is the choice of system architecture and the criteria by which its effectiveness is evaluated. In mobile robot parking control systems, architecture defines how sensors, computational modules, and actuators are integrated to implement the full perception-to-action cycle. The most common design follows a three-layer structure: the sensing layer (data acquisition), the decision-making layer (processing and planning), and the actuation layer (command execution). The effectiveness of such systems is assessed based on several criteria, including positioning accuracy within the parking space, maneuver execution speed, adaptability to environmental changes, energy efficiency, and fault tolerance. The closer the integration between sensory and computational components and the more responsive the system is to dynamic changes, the more effective the architecture is considered.

## Conclusions

During this study, a comprehensive analysis was conducted on current approaches to modeling mobile robot parking control systems based on distance sensor

data, with particular emphasis on ultrasonic sensors. The review synthesizes system architectures, algorithmic strategies, types of sensor configurations, and key criteria for evaluating the effectiveness of autonomous parking. It has been shown that ultrasonic sensors, due to their simplicity, affordability, and reliability in short-range detection, remain a core component of many parking systems, especially in constrained environments and platforms with limited computational resources. At the same time, other sensors, such as infrared detectors and visual cameras, offer significant advantages in terms of accuracy, sensing range, and adaptability, making them essential for integration into hybrid or high-precision systems.

The review has examined key decision-making methodologies, including rule-based logic, finite state machines, fuzzy logic, and machine learning techniques. Each of these has proven effective in specific applications, ranging from simple reactive behaviors to self-learning strategies suitable for complex, dynamic environments. Hybrid models that combine classical logic with adaptive elements are particularly promising for achieving autonomous parking in real-world settings.

Furthermore, system architectures were analyzed with a focus on how effectively sensory input, processing logic, and actuation are integrated. Key performance indicators include parking precision, robustness to external disturbances, response speed, energy consumption, and adaptability. The most effective architectures are those that support real-time responsiveness, tolerate uncertainty, and ensure operational robustness.

In conclusion, the development of an intelligent, flexible, and reliable mobile robot parking control model constitutes a multi-layered engineering challenge. It encompasses both hardware and algorithmic components and requires an interdisciplinary approach to achieve a robust and deployable solution.

## REFERENCES

1. J. H. Ang, T. S. Min. A Review on Sensor Technologies and Control Methods for Mobile Robot with Obstacle Detection System. *International Journal on Robotics, Automation and Sciences*, 6(1), 2024. P. 78–85. <https://doi.org/10.33093/ijoras.2024.6.1.11>
2. Y. Wei. Applications of Ultrasonic Sensors: A Review. *Proceedings of the 5th International Conference on Signal Processing and Machine Learning. Applied and Computational Engineering*. Vol. 99, 2025. P. 144-148. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/99/20251773>
3. P. Mitra. New 3D ultrasonic sensor reduces costs, improves mobile robot safety. *Control Engineering. Robotics. Visison and Discrete Sensors*, 2025. <https://www.controleng.com/new-3d-ultrasonic-sensor-reduces-costs-improves-mobile-robot-safety/>
4. K. Sandven. New 3D Ultrasonic Sensor Technology Dramatically Reduces Costs and Improves Safety for Mobile Robot Developers. *Machine Design. Sonair*, 2024. <https://www.machinedesign.com/markets/robotics/article/55232927/sonair-new-3d-ultrasonic-sensor-technology-dramatically-reduces-costs-and-improves-safety-for-mobile-robot-developers>
5. W. Mason, D. Brenken, F. Dai, R. C. Castillo, O. St-Martin Cormier, A. Sedal. Acoustic tactile sensing for mobile robot wheels. *Cornell University. Computer Science. Robotics*, 2024. 12 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.18682>
6. D. Gualda, J. Ureña, J. C. García, E. García, J. Alcalá. Simultaneous calibration and navigation (SCAN) of multiple ultrasonic local positioning systems. *Elsevier. Information Fusion*. Vol.45, 2019. P. 53-65. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.01.00>
7. A. Al Mamun, A. Hasib, A. Salyh Muhammad Mussa, R. Hossen, A. Rahman. IoT-Enabled Smart Car Parking System through Integrated Sensors and Mobile Applications. *Cornell University. Computer Science. Cryptography and Security*, vol.1, 2024. 8 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.10774>
8. Flach P. A. *Machine Learning: The Art and Science of Algorithms that Makes Sense of Data*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 291 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511973000>

Received (Надійшла) 13.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.08.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Гук Артем Сергійович** – старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Artem Huk** – Senior Lecturer Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [artem.huk@nure.ua](mailto:artem.huk@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0004-2011-1901>.

**Дяченко Владислав Олександрович** – старший викладач, аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Vladyslav Diachenko** – PhD student, Senior Lecturer Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [vladyslav.diachenko@nure.ua](mailto:vladyslav.diachenko@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0003-2725-8784>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57207260441>.

**Ілларіонов Максим Юрійович** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Maksym Illarionov** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [maksym.illarionov@nure.ua](mailto:maksym.illarionov@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0007-2352-050X>.

**Тітова Єлизавета Сергіївна** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Yelyzaveta Titova** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [yelyzaveta.titova@nure.ua](mailto:yelyzaveta.titova@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0009-9465-1683>.

### Моделі управління паркуванням мобільного робота на основі даних від датчика відстані

А. С. Гук, В. О. Дяченко, М. Ю. Ілларіонов, Є. С. Тітова

**Анотація. Актуальність.** Зростаюча потреба в автономних мобільних системах, здатних до самостійного орієнтування і паркування, обумовлена кількома вагомими факторами. По-перше, активна роботизація у сферах логістики, охорони, доставки та обслуговування потребує надійних механізмів для точного позиціонування мобільних платформ у просторово обмежених середовищах. По-друге, у контексті розвитку безпілотного транспорту проблема автоматичного паркування набуває пріоритетного значення для підвищення рівня безпеки, зниження енергоспоживання та мінімізації участі людини в управлінні. Нині існує велика кількість досліджень, спрямованих на реалізацію систем автоматичного паркування, однак більшість з них або базуються на високовартісних сенсорах (лідарах, камерах з глибоким навчанням), або не забезпечують необхідної точності в умовах динамічних або незнайомих середовищ. На цьому тлі використання ультразвукових датчиків становить ефективну альтернативу, що дозволяє забезпечити необхідний рівень адаптивності та чутливості при збереженні низької вартості системи. Актуальність дослідження підкріплюється необхідністю створення універсальної моделі управління, яка могла б бути масштабованою, адаптивною та легко інтегруватися в різні типи мобільних платформ. У роботі приділяється особлива увага не лише теоретичному опису управлінської моделі, але й експериментальній перевірці її ефективності на основі даних від ультразвукових сенсорів, що відображають фізичне середовище у режимі реального часу. Таким чином, розробка моделі управління паркуванням мобільного робота на основі ультразвукових датчиків є актуальним завданням, яке поєднує в собі як наукову новизну, так і практичну значущість для подальшого розвитку автономних систем. **Об'єкт дослідження:** система управління паркуванням мобільного робота, що функціонує на основі даних, отриманих від ультразвукових датчиків відстані. Ця система включає в себе як апаратні компоненти (ультразвукові сенсори, виконавчі механізми, контролери), так і програмне забезпечення, що реалізує алгоритми аналізу навколишнього середовища, прийняття рішень щодо паркувального маневру та керування рухом. **Мета статті** дослідження сучасних моделей управління паркуванням мобільного робота, що функціонують на основі даних від сенсорів відстані, з метою виявлення ефективних підходів до сенсорного забезпечення, алгоритмічного керування та архітектурної реалізації таких систем, а також визначення перспектив їх розвитку для забезпечення точності, надійності та адаптивності в умовах реального середовища. **Результати дослідження.** У результаті проведеного оглядового дослідження було встановлено, що в сучасних системах управління паркуванням мобільних роботів існує широкий спектр підходів до моделювання, які відрізняються як за рівнем математичної складності, так і за типом сенсорного забезпечення. Виявлено, що вибір моделі безпосередньо пов'язаний із рівнем доступу до обчислювальних ресурсів, типом шасі робота та природою середовища, в якому він функціонує. Особливу увагу приділено порівнянню сенсорів, з яких саме ультразвукові сенсори продовжують доминувати у системах короткодистанційного позиціонування завдяки своїй низькій вартості, простоті інтеграції та надійності в контрольованих умовах. Водночас сенсори LiDAR продемонстрували найвищу точність і просторову інформативність, хоча й залишаються складнішими у реалізації та обслуговуванні. Камери та інфрачервоні сенсори розглянуто як додаткові джерела інформації, які ефективно працюють лише в межах чітко визначених умов і при належному програмному забезпеченні. Результати огляду підтвердили, що ефективна система управління паркуванням мобільного робота базується на комплексному підході до вибору сенсорів, моделі керування, алгоритмічного забезпечення та архітектурної реалізації. Це дає змогу досягти високої точності та надійності функціонування навіть у складних, нестабільних або обмежених середовищах. **Висновки.** Ефективне управління паркуванням мобільного робота ґрунтується на поєднанні надійного сенсорного забезпечення, зокрема ультразвукових датчиків, і адаптивних алгоритмів прийняття рішень. Ультразвукові сенсори залишаються оптимальними для недорогих і простих систем, тоді як гібридні підходи з використанням LiDAR або камер забезпечують вищу точність. Серед алгоритмів найбільш ефективними виявились FSM, нечітка логіка та методи машинного навчання. Оптимальною є модульна архітектура з чітким поділом сенсорного, обчислювального та виконавчого рівнів, що забезпечує адаптивність, точність і стабільність роботи системи в реальних умовах.

**Ключові слова:** мобільний робот, автономне паркування, ультразвукові датчики, сенсорне забезпечення, алгоритми прийняття рішень, скінченний автомат, нечітка логіка, машинне навчання, керування рухом, система навігації.

О. Г. Дрючко, Н. В. Бунякіна, Б. Р. Боряк, Р. В. Захарченко, Л. П. Давиденко

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

## ТЕРМОАНАЛІТИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОХАРАКТЕРИЗУВАННЯ Й ІДЕНТИФІКАЦІЇ РЕЧОВИН МЕТОДОМ ДИФЕРЕНЦІЙНО-ТЕРМІЧНОГО АНАЛІЗУ ТА ЙОГО МОЖЛИВІ ДЕЯКІ СФЕРИ ЗАСТОСУВАННЯ

**Анотація.** Розроблено простий багатоцільовий термоаналітичний комплекс з комбінованим диференційно-термічним методом дослідження для ідентифікації речовин за температурами фазових перетворень (плавлення, кипіння, кристалізації, поліморфних переходів), термічного розкладання; вивчення природи і температурних меж протікання низки теплових ефектів – ступінчастих; близько розташованим за температурним значенням; таких, які накладаються (зумовлені зміною просторової модифікації, дегідратації, розкладання та ін.); функціональних залежностей фізичних властивостей речовин; якісного, а в деяких випадках і кількісного аналізу механічних сумішей кількох речовин; вимірювання температур фазових переходів індивідуальних речовин і систем, побудови на їх основі діаграм стану; вивчення кінетичних та термодинамічних параметрів фазових і хімічних їх перетворень; визначення теплофізичних та інших властивостей речовин зі зміною температури тощо. В основу функціонування аналітичного засобу покладене використання диференціально-термічного методу дослідження зразка й індиферентної речовини. Він складається з легкозрозбірних електричних печей із спеціальними тримачами та касетами для зразків і еталону, пристрою лінійного програмного регулювання температури з фазовим керуванням, планшетного двохкоординатного компенсаційного потенціометра для запису термограм досліджуваних зразків в координатах  $\Delta T$ - $T$ . Його робочий температурний інтервал визначається областю значень використання хромель-алюмелевих (ХА) перетворювачів, до 1300 °С. Високі метрологічні характеристики комплексу забезпечуються використанням ХА термопар у негативному зворотному зв'язку пристрою регулювання температури; рядом схемних і конструкторських рішень його реалізації; прецизійним керуванням подачею середньої теплової енергії у зону нагрівання програмним задаванням пропорційного з часом закону «розгортки» величини опорної напруги задатчика. Залежно від цілей втілюваних завдань пристрій може бути використаний самостійно в локальних системах чи у комплексі засобів під час проведення термоаналітичних досліджень. Розробка може бути використана для фундаментальних наукових досліджень; у виробничих лабораторіях для проведення експрес-аналізу фазового складу вхідної сировини і готової продукції, її випробуваннях, тестуванні, оцінюванні надійності й визначенні ресурсу напрацювання; сертифікації; при встановленні функціональних зв'язків досліджуваних об'єктів; з'ясування умов синтезу і модифікації властивостей сучасних багато функціональних матеріалів різного призначення та інших аналогічних цілей.

**Ключові слова:** термо-аналітичний комплекс, диференційно-термічний метод дослідження, лінійне програмне регулювання температури, теплофізичні перетворення речовин, двокоординатний запис термограм  $\Delta T$ - $T$ .

### Вступ

У роботі триває обговорення результатів комплексних досліджень, що проводяться авторами, спрямованих на вирішення фундаментальних завдань зі створення нових й удосконалення наявних технологій одержання досконалих однофазних оксидних матеріалів перехідних і рідкісноземельних елементів зі структурою перовскіта, граната із відтворюваними властивостями низькотемпературними методами «м'якої хімії» та з використанням нітратних прекурсорів. Ці сполуки є абсолютними лідерами як за масштабами їх використання, так і щодо уваги з боку дослідників [1–10]. Тому сучасне матеріалознавство на їх основі потребує технологічних регламентів простих за конфігурацією, мало-стадійних, енергоєфективних, таких, що характеризуються масштабістю, з можливістю відтворення продуктів із заданими однорідністю, стабільністю, комплексом наперед заданих характеристик.

Існує багато методик синтезу вказаних оксидних багатоконпонентних матеріалів [2–11], заснованих на різних фізичних і хімічних принципах. Основними з них є:

- високотемпературний метод твердофазних хімічних реакцій;
- конденсаційні рідкофазні методи отримання нанорозмірних оксидних матеріалів засновані на:

– різних варіантах змішування вихідних компонентів (хімічного осадження (співосадження); золь - гель; гідротермальний; комплексонатної гомогенізації; заміни розчинника; синтез під дією мікрохвильового випромінювання);

– швидкому термічному розкладанні прекурсорів у розчині (розпилювальна сушка; швидкого розширення надкритичних флюїдних розчинів; кріохімічний);

– самозайманні (гліцин-нітратний; метод Пекіні; целюлозна (тканинна, паперова) технологія; піроліз полімерно-сольових плівок).

Вибір використання конкретного методу залежить від хімічної природи отримуваних сполук, розміру і морфологічних особливостей частинок продуктів синтезу, можливостей наявної лабораторної бази тощо. Ці методи використовують як незалежно один від одного, так і в комбінації.

Відомі широкі можливості хімічного дизайну нових матеріалів на основі шаруватих перовскітоподібних сполук, заснованих на різних реакціях іонного обміну в їх структурі, процесів інтеркаляції, топохімічної конденсації [12]. Вказані реакції можуть бути використані для отримання багаточарових гомологів перовскітоподібних оксидів з менш стійких, метастабільних, структурних фрагментів та бути набором інструментів під час створення поліфункціональних матеріалів на їх основі.

Отримані з їх допомогою нові речовини з шаруватою структурою зберігають структурні особливості своїх перовскітоподібних попередників. При цьому велика варіативність їх складу і структури пояснює широкий спектр функціональних властивостей, притаманний таким матеріалам, та можливість застосування як мультиферроїків, високотемпературних напівпровідників, суперіонних провідників, діелектричної кераміки, надпровідників, каталізаторів, люмінофорів тощо.

Претендує на увагу нещодавно розроблена групою авторів нова низькотемпературна (350 °С) технологічна схема [13] отримання порошкових чистих та легованих лантаноїдвмісних складних оксидів (перовскітового і гранатового типу) шляхом об'єднання твердотільної реакції метатезису (спонтанного обміну атомними / іонними складовими між реагентами після короткого періоду ініціювання (використання, наприклад, мікрохвильового випромінювання, механічної, теплової активації) або реакції зсуву) та розплавленого нітрату лужного металу (чи суміші нітратів металів) як реакційного середовища. Запропонована двоетапна методологія є швидкою, простою і не передбачає використання будь-яких дорогих хімікатів. Це не потребує ні складного, ні дороговартісного обладнання, ні спеціальних запобіжних заходів. Наскільки нам відомо, це найнижча температура синтезу, яку коли-небудь повідомляли про однофазні перовскітові порошки. Метод також виявився корисним для одержання акцептор-легованих порошоків, що мають гарні характеристики спікання, а отже, перспективи використання під час виготовлення електродів, киснево-провідних електродів для твердих оксидних паливних елементів, які демонструють майже чисту провідність іонів кисню при малому парціальному тиску кисню і високих температурах, відмінну термічну і хімічну стійкість при стандартних умовах експлуатації; керамічних мембран для розділення кисню та часткового окиснення вуглеводнів, газових датчиків та інше.

Нині сформульовані загальні принципи відносно розподілу катіонів за кристалографічними місцями структури досліджуваних оксидів та виявлені великі можливості ізоморфних заміщень. З'ясовуються способи керування параметрами функціональних матеріалів на їхній основі за рахунок вибору складу, умов синтезу і наступного оброблення. Процеси одержання цільового продукту проходять через низку стадій і супроводжуються утворенням проміжних фаз. Знання про їх склад, умови утворення й існування, властивості, особливості і закономірності перетворення дають можливість керувати такими процесами і проводити направлений синтез.

Накопичені нові знання про природу і механізми досліджуваних явищ, тенденції розвитку технічних засобів, розширення сфер використання сучасних оксидних РЗЕ-вмісних поліфункціональних матеріалів, підвищення вимог до їх стабільності і відтворення комплексу функціонально-технологічних характеристик, пошук напрямів удосконалення

технологій їх виготовлення і можливостей апаратного забезпечення зумовили продовження нашого дослідження з даної теми та розроблення прецизійних технічних засобів для з'ясування фундаментальних теплових перетворень досліджуваних об'єктів і їх можливої практичної реалізації.

**Постановка завдання.** Для успішної реалізації послідовної методології з вивчення теплових перетворень досліджуваних об'єктів необхідно:

- застосувати метод диференційно-термічного аналізу (як найбільш чутливий до характерних змін) для охарактеризування сумісної поведінки складових компонентів систем;
- розробити пристрій програмного формування лінійного закону зміни температури в робочій зоні нагрівання;
- з'ясувати характеристики запропонованого засобу та його технічні можливості;
- виявити особливості і закономірності у поведінці продуктів перероблення;
- інтерпретувати одержані результати;
- виявити впливаючі фактори і їх домінантність;
- одержані результати покласти в основу проведення запропонованого технологічного регламенту послідовного процесу перероблення.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Розроблено простий багатоцільовий термоаналітичний комплекс (рис. 1) з комбінованим диференційно-термічним методом дослідження для ідентифікації речовин за температурами фазових перетворень (плавлення, кипіння, кристалізації, поліморфних переходів), термічного розкладання; вивчення природи і температурних меж протікання низки теплових ефектів – ступінчастості; близько розташованим за температурним значенням; таких, які накладаються (зумовлені зміною просторової модифікації, дегідратації, розкладання та ін.); функціональних залежностей фізичних властивостей речовин; якісного, а в деяких випадках і кількісного аналізу механічних сумішей кількох речовин; вимірювання температур фазових переходів індивідуальних речовин і систем, побудови на їх основі діаграм стану; вивчення кінетичних та термодинамічних параметрів фазових і хімічних їх перетворень; визначення теплофізичних та інших властивостей речовин зі зміною температури тощо.

В основу функціонування аналітичного засобу покладене використання диференціально-термічного методу дослідження зразка й індиферентної речовини. Він складається з легкорозбірних електричних печей із спеціальними тримачами та касетами для зразків і еталону, пристрою лінійного програмного регулювання температури з фазовим керуванням, планшетного двохкоординатного компенсаційного потенціометра для запису термограм досліджуваних зразків в координатах  $\Delta T$ - $T$ . Його робочий температурний інтервал визначається областю значень використання хромель-алюмелевих (ХА) перетворювачів, до 1300 °С [14]. Високі метрологічні характеристики комплексу забезпечуються використанням ХА термопари у негативному зво-

ротному зв'язку пристрою регулювання температури; рядом схемних і конструкторських рішень його реалізації; прецизійним керуванням подачею середньої теплової енергії у зону нагрівання програмним задаванням пропорційного з часом закону

«розгортки» величини опорної напруги задатчика. Залежно від цілей втілюваних завдань пристрій може бути використаний самостійно в локальних системах чи у комплексі засобів під час проведення термо-аналітичних досліджень.

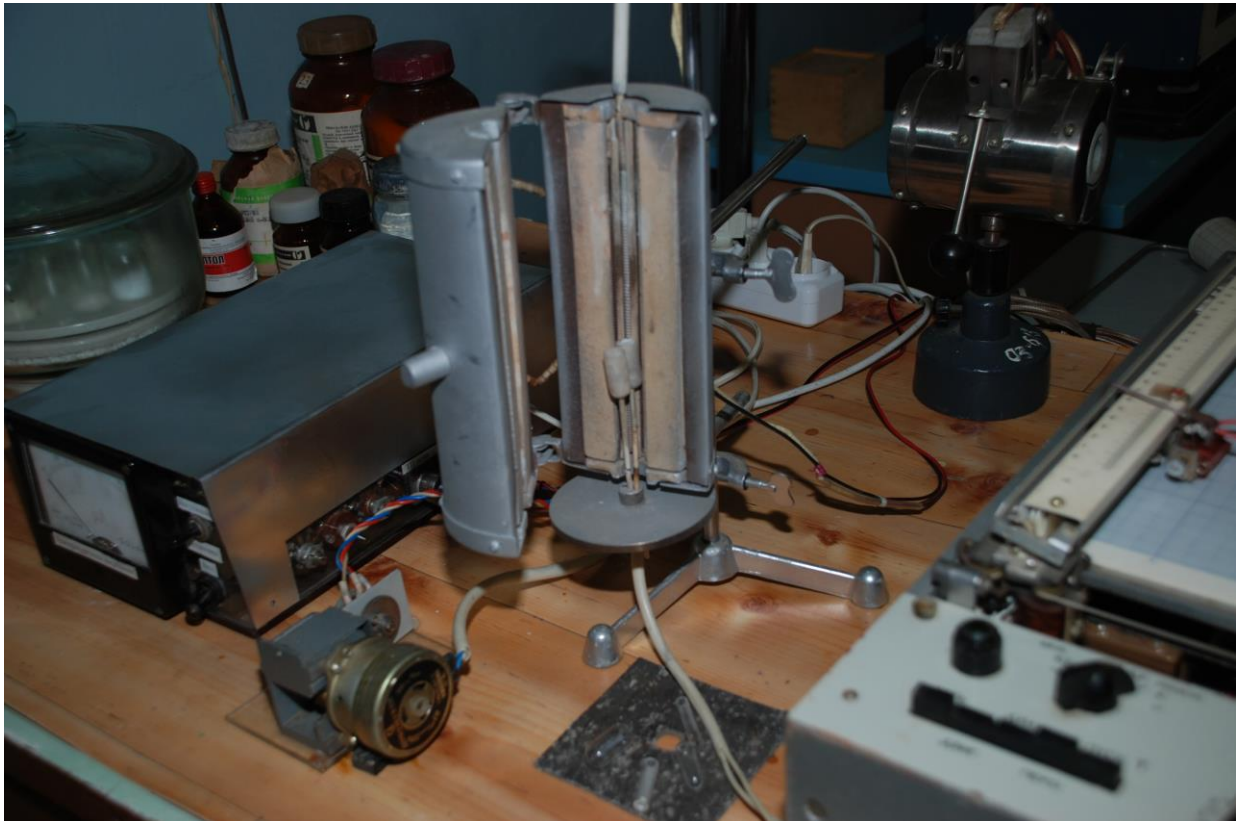


Рис. 1. Комплекс для охарактеризування й ідентифікації речовин методом диференційно-термічного аналізу

Комплекс розроблено з метою створення нескладними технічними засобами багатоцільового програмного формувача лінійного з часом закону зміни температури у робочій зоні легкорозбірного касетного нагрівача з можливістю візуального спостереження за зразком й хорошим відтворенням умов і режиму дослідження, з високою надійністю й вдалим метрологічними характеристиками для оснащення лабораторних, наукових і виробничих термоаналітичних комплексів з вивчення температурної поведінки і встановлення функціональних залежностей параметрів досліджуваних об'єктів.

Запропонована розробка є одним із можливих простих варіантів її реалізації, результатом тривалого творчого пошуку можливості поєднання ефективності й переваг принципів, що лежать в основі побудови сучасних систем регулювання в блоці керування програмуванням температури в дериватографі [15] і підвищеної стійкості та надійності роботи прецизійних систем керування тепловими процесами, організованих із застосуванням лінійних елементів у головному контурі негативного зворотного зв'язку [16].

Можливі й інші, наприклад, у поєднанні з електронним дискретним задаванням опорної напруги, що особливо важливо при автоматизації експерименту і для підвищення його надійності.

Спосіб програмного формування лінійного закону зміни температури нагрівника технічно реалізований у пристрої формування лінійного закону зміни температури (ПФЛЗТ) для спеціально розробленого багатоцільового термоаналітичного комплексу, структурна схема якого приведена на рис. 2 і дозволяє наочно розібратися у підходах щодо вирішення поставленої задачі.

Робота програмного регулятора температури (ПФЛЗТ) запатентована [17] і базується на фазовому методі керування потужністю, що підводиться до електричних нагрівників опору. Він складається із:

- задатчика температури,
- первинного перетворювача (датчика температури - хромель-алюмелевої термопари, ТХА),
- вузла віднімання (ВВ) на основі диференціального операційного підсилювача,
- порогового пристрою (тригера Шмітта, ТШ),
- генератора з лінійним законом зміни напруги (ГЛЗН) для синхронізування роботи пристрою з частотою напруги живлення, блокінг-генератора (БГ),
- силового блока,
- схеми індикації режимів роботи пристрою,
- схеми індикації пориву кола термоперетворювача,
- параметричного стабілізатора двополярної напруги живлення.

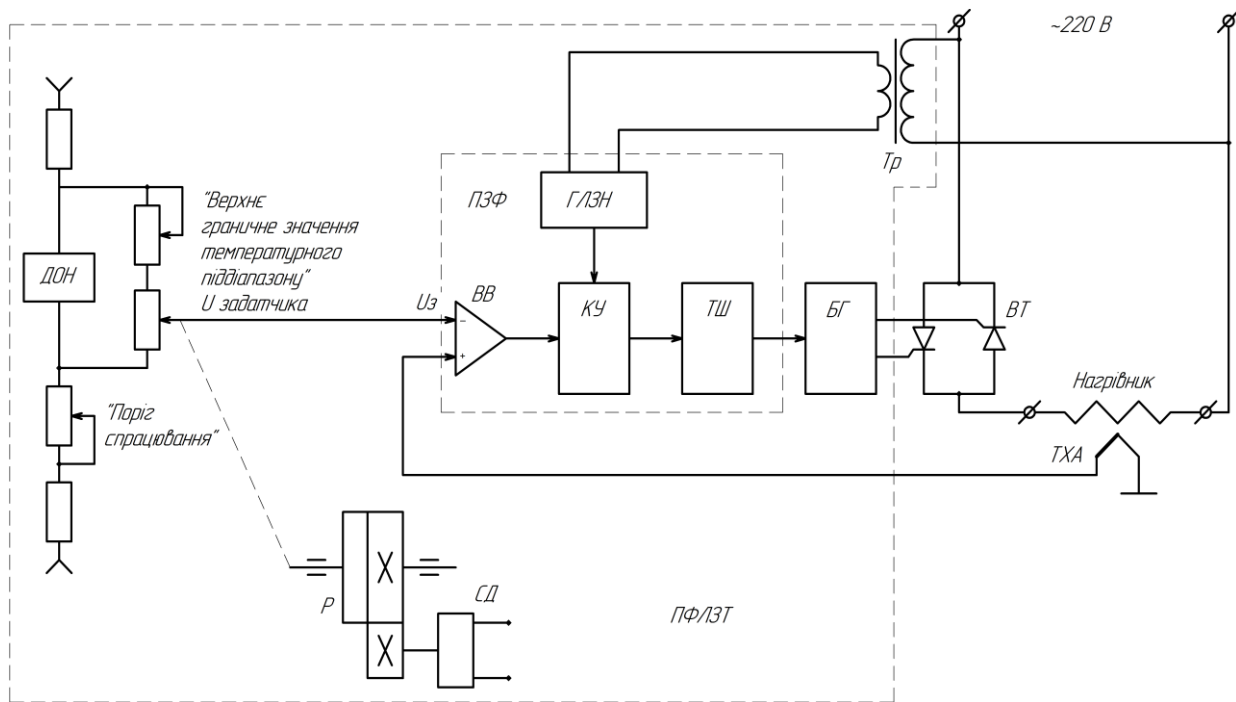


Рис. 2. Спосіб програмного формування лінійного закону зміни температури нагрівника

У вузлі задатчика опорної напруги використано серійний змінний потенціометр СП із лінійною залежністю опору від кута повороту (характеристика А) після нескладного видалення фіксатора кінцевого положення, на вал якого насаджена шестерня.

Редуктор (Р) зі здвоєними шестернями й храповиком дозволяють легко змінювати положення движка потенціометра в процесі проведення експерименту, а також встановлювати його в початкове положення.

Для зручності експлуатації потенціометр, редуктор, синхронний двигун (СД) жорстко закріплені на загальній виносній платформі.

Проведенню експерименту передують підготовчі стадії:

а) повзунок потенціометра задатчика із храповим механізмом встановлюють у крайнє початкове положення;

б) потенціометр корекції „поріг спрацювання” переводять у положення, що відповідає моменту включення системи керування;

в) визначають  $t_{\text{поч. об'єкта}}$  дослідження;

г) залежно від цілей поставлених завдань і режиму програмування піднімання температури вибирають передаточне відношення редуктора приводного механізму часової „розгортки” опорної напруги задатчика й встановлюють відповідно з таблицею додатку [14] та графічною температурною характеристикою термоперетворювачів із хромель-алюмелевих сплавів (рис. 2).

$U_{\text{опорне верхнє}}$ , що відповідає верхньому граничному значенню досліджуваного температурного піддіапазону.

Після виконання усіх підготовчих операцій за командою „пуск” розпочинається робота комплексу в автоматичному режимі.

Напруга задатчика температури з прецизійного опорного джерела (ДОН) подається на інвертуючий вхід вузла віднімання (ВВ). На його неінвертуючий вхід приєднана хромель-алюмелева термопара, яка введена у ланцюг головного контуру негативному зворотному зв'язку системи регулювання, а вибір її типу зумовлений природною практично лінійною залежністю ЕРС від температури, яка характерна для електродів із хромель-алюмелевих сплавів.

„Гарячий” спай термопари розташовується біля нагрівника й ізолюється тонким шаром термостійкого діелектрика. Різниця напруг задатчика і термопари є сигналом похибки. На вході каскаду узгодження (ВВ) сигнал похибки складається з напругою формувача лінійно змінної напруги (ГЛЗН). При умові

$$U_{\text{вих.ВВ}} + U_{\text{вих.ГЛЗН}} \geq U_{\text{верх.пор.}}$$

на виході тригера Шмітта утворюються прямокутні імпульси, задній фронт яких „фіксований” і співпадає з кінцем робочого півперіоду напруги живлення в мережі, а передній фронт „зміщується” при зміні сигналу похибки в системі відслідковування терморегулюючого пристрою.

Прямокутні імпульси, що формуються тригером Шмітта, керують роботою блокин-генератора, на виході якого з'являються серії імпульсів загальною шириною, що відповідають тривалості прямокутних імпульсів. Блокин-генератор застосовується для електричного розв'язування кола керування зі силовою частиною регулюючого пристрою за допомогою імпульсного трансформатора. Імпульси зі вторинної обмотки трансформатора блокин-генератора керують фазою відкриття силового тиристорного вентиля (ВТ), здійснюючи таким чином пропорційне керування

середньою потужністю нагрівача. Подача енергії в об'єкт здійснюється до тих пір, поки температура в ньому не досягне заданого значення. При цьому напруга на виході диференційного підсилювача наближається до нуля, і силовий клапан закривається (призакривається).

Система повільно проходить через низку послідовних квазіблизьких станів, відтворюючи лінійну температурну закономірність із часом у зоні нагрівання.

Пристрій з таким лінійним додатковим ланцюгом н. з. з. виявляє слабку залежність від нестабільності вихідних компонентів і при великій глибині негативного зворотного зв'язку за потужністю забезпечує не тільки високу лінійність коефіцієнта передачі, але й слабку залежність вихідної потужності від коливань напруги живлення.

Перевагою даного способу при технічній його реалізації у системі керування нагрівником за відхиленням температурного параметра при вирішенні поставленої задачі - є використання у системі датчика параметра й лінійного негативного зворотного зв'язку природної лінійної залежності термо-ЕРС хромель-аломелевих сплавів від різниці температури їх гарячого і холодного спаїв, яка сьогодні не використовується в жодному подібному аналітичному засобі. Він являє інтерес за схемним і конструкційним шляхами вирішення проблеми формування закону регулювання температури об'єкта -

простий, з високою чутливістю і хорошою розрізнувальною здатністю.

Реалізується на сучасних комплектуючих елементах, які серійно виготовляються, і може бути запропонований для використання при вирішенні багатьох аналогічних задач.

Комплекс може бути використаний для аналогічних наукових досліджень; у виробничих лабораторіях для проведення експрес-аналізу фазового складу вхідної сировини і готової продукції, її випробуваннях, тестуванні, оцінюванні надійності й визначенні ресурсу напруження; сертифікації; при встановленні функціональних зв'язків досліджуваних об'єктів тощо.

## Висновки

Приладові характеристики розробленого термо-аналітичного комплексу дозволяють отримувати надійні емпіричні тепло-фізичні дані, що стають основою для виявлення, ідентифікації, контролю утворених фаз, визначення елементного складу і вмісту проб, проведення аналізу і порівняння фазового стану об'єктів у підготовчих стадіях перероблення в інноваційних технологіях з використанням попередників елементів різної електронної структури і різними комбінованими способами їх активації, встановлення технологічно-функціональних залежностей, керованого модифікування властивостей продуктів синтезу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мазуренко Е.А., Герасемчук А.И., Трунова Е.К. и др. Координационные соединения металлов – прекурсоры функциональных материалов. *Укр. хим. журн.* 2004. Т. 70, № 7. С. 32–37.
2. Белоус А.Г. Некоторые тенденции развития функциональных материалов на основе сложных оксидных систем. *Укр. хим. журн.* 2009. Т. 75, № 7. С. 3–14.
3. Zhang Q., Schmidt N., Lan J. et al. A facile method for the synthesis of the  $\text{Li}_{0.3}\text{La}_{0.57}\text{TiO}_3$  solid state electrolyte. *Chem. Com.* 2014, vol. 50, pp. 5593–5596.
4. Гавриленко О.М., Пашкова О.В., Белоус А.Г. Кристаллохімічні особливості та властивості  $\text{Li}^+$ ,  $\{\text{Na}^+, \text{K}^+\}$ -заміщених ніобатів лантану і структурою дефектного перовскіту. *Укр. хим. журн.* 2005. Т. 71, № 8. С. 73–77.
5. Almadhi A., Injac S., Ji K., Ritterb C., Atfield P. Chemical tuning of a double double perovskite oxide. *Chem. Commun.* 2025, vol. 61, pp. 13469–13472.
6. Гавриленко О.М. Літій-провідні матеріали на основі ніобатів і танталатів лантану: синтез, структура, властивості. *Укр. хим. журн.* 2004. Т. 70, № 9. С. 31–34.
7. Chu W-F., Thangadural V., Weppner W. Ionics – a key technology for our energy and environmental needs on the rise. *Ionics.* 2006, no. 12, pp. 1–6.
8. Ramzy A., Thangadural V. Tailor-Made Development of Fast Li Ion Conducting Garnet-Like Solid Electrolytes. *A. Chem. Soc.* 2010, vol. 2, no. 2, pp. 385–390.
9. Белоус А.Г. Сложные оксиды металлов для сверхвысокочастотных и высокопроницаемых диэлектриков. *Укр. хим. журн.* 2008. Т. 74, № 1. С. 3–21.
10. Jena H., Govindan Kutty K.V. Studies on the ionic transport and structural investigations of  $\text{La}_{0.5}\text{Li}_{0.5}\text{TiO}_3$  perovskite synthesized by wet chemical methods and the effect of Ce, Zr substitution at Ti site. *J. Mater. Sci.* 2005, vol. 40, pp. 4737–4748.
11. Varma A., Mukasyan A.S., Rogachev A.S. et al. Solution Combustion Synthesis of Nanoscale Materials. *American Chemical Society. Chem. Rev.* 2016, vol. 116, pp. 14493–14586.
12. Schaak R.E., Mallouk T.E. Perovskites by Design: A Toolbox of Solid-State Reactions. *Chemistry of Materials.* 2002, vol. 14, no. 4, pp. 1455–1471.
13. Mendoza E., Padmasree K.P., Montemayor S.M. et al. Molten salts synthesis and electrical properties of Sr- and/or Mg-doped perovskite-type  $\text{LaAlO}_3$  powders. *Journal of Materials Science.* 2012, vol. 47, pp. 6076–6085.
14. International Standard IEC 60584-1:2013 Thermocouples - Part 1: EMF specifications and tolerances. ICS [17.200.20 - Temperature-measuring instruments](#). ISBN 978-2-8322-1047-5
15. Derivatograph Q-1500 D. Operation manual. MOM, Optical Instruments Factory. Budapest, 2009. – 102 p.
16. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування / М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.

17. Пат. 43549 Україна. МПК G 05 D 23/00. Спосіб програмного формування лінійного закону зміни температури нагрівника / О.Г. Дрючко, Д.О. Стороженко, Н.В. Бунякіна, І.О. Іваницька – у 2009 01783; Заявлено 02.03.2009; Опубл. 25.08.2009, Бюл. №16. – 10 с.

Received (Надійшла) 14.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.08.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Дрючко Олександр Григорович** – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;  
**Oleksandr Dryuchko** – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Poltava, Ukraine; e-mail – [itm.dryuchko@nupp.edu.ua](mailto:itm.dryuchko@nupp.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2157-0526>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6504199218>.

**Бунякіна Наталія Володимирівна** – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та фізики, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;  
**Natalia Bunyakina** – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry and Physics, Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Poltava, Ukraine; e-mail – [nning.bunyakina@nupp.edu.ua](mailto:nning.bunyakina@nupp.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-4241-5127>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506551562>.

**Боряк Богдан Радиславович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;  
**Bohdan Boryak** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Poltava, Ukraine; e-mail – [boryakbr@nupp.edu.ua](mailto:boryakbr@nupp.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-8114-7930>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58983614200>.

**Захарченко Руслан Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;  
**Ruslan Zakharchenko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Poltava, Ukraine; e-mail – [itm.rvzakharchenko@nupp.edu.ua](mailto:itm.rvzakharchenko@nupp.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-4651-0159>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221734157>.

**Давиденко Людмила Павлівна** – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та фізики, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;  
**Lyudmila Davydenko** – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry and Physics, Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Poltava, Ukraine; e-mail – [nning.davydenko@nupp.edu.ua](mailto:nning.davydenko@nupp.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-0072-7328>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603603657>.

**Thermoanalytical complex  
for characterization and identification of substances  
by the method of differential thermal analysis and some of its possible areas of application**

Oleksandr Dryuchko, Natalia Bunyakina, Bohdan Boryak, Ruslan Zakharchenko, Lyudmila Davydenko

**Abstract.** A simple multi-purpose thermoanalytical complex with a combined differential-thermal method of research has been developed for the identification of substances by the temperatures of phase transformations (melting, boiling, crystallization, polymorphic transitions), thermal decomposition; studying the nature and temperature limits of a number of thermal effects - stepwise; closely located by temperature value; those that overlap (caused by a change in spatial modification, dehydration, decomposition, etc.); functional dependencies of physical properties of substances; qualitative, and in some cases quantitative analysis of mechanical mixtures of several substances; measurement of phase transition temperatures of individual substances and systems, construction of state diagrams on their basis; study of kinetic and thermodynamic parameters of their phase and chemical transformations; determination of thermophysical and other properties of substances with a change in temperature, etc. The operation of the analytical tool is based on the use of the differential-thermal method of research of the sample and indifferent substance. It consists of easily dismountable electric furnaces with special holders and cassettes for samples and the standard, a device for linear program temperature control with phase control, a tablet two-coordinate compensation potentiometer for recording thermograms of the samples under study in  $\Delta T$ - $T$  coordinates. Its operating temperature range is determined by the range of values of the use of chromel-alumel (HA) converters, up to 1300 °C. High metrological characteristics of the complex are ensured by the use of a HA thermocouple in the negative feedback of the temperature control device; a number of circuit and design solutions for its implementation; precision control of the supply of average thermal energy to the heating zone by software setting the proportional to time law of the "sweep" value of the reference voltage of the setter. Depending on the goals of the implemented tasks, the device can be used independently in local systems or in a complex of means during thermoanalytical studies. The development can be used for fundamental scientific research; in production laboratories for rapid analysis of the phase composition of incoming raw materials and finished products, their testing, evaluation of reliability and determination of service life; certification; when establishing functional relationships of the objects under study; clarification of the conditions for synthesis and modification of the properties of modern multifunctional materials for various purposes and other similar purposes.

**Keywords:** thermo-analytical complex, differential thermal research method, linear program temperature control, thermophysical transformations of substances, two-coordinate recording of thermograms  $\Delta T$ - $T$ .

О. С. Євтушенко, О. Ю. Заковоротний

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОЛИВАНЬ РУХОМОГО СКЛАДУ НА КРИВОЛІНІЙНІЙ ДІЛЯНКЦІ ШЛЯХУ ДЛЯ БОРТОВОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

**Анотація.** З точки зору дії, яку коливання чинять на рух поїзда, найбільш впливовим є процес проходження рухомим складом криволінійної ділянки шляху. У статті розглядаються проблеми, пов'язані з динамічними процесами під час руху залізничного транспорту по криволінійним ділянкам шляху. Зокрема, аналізуються коливання виляння та бокового виносу, які мають значний вплив на безпеку руху, комфорт пасажирів та ступінь зношування механічних компонентів. В якості шляху пом'якшення проблеми коливань розглядається доповнення системи підтримки прийняття рішень новим програмним компонентом. У результаті аналізу сучасних наукових досліджень розроблено математичну модель руху дизель-поїзда, що враховує особливості проходження кривих ділянок шляху. Модель дозволяє провести аналіз динамічних характеристик та може бути застосована у якості програмного компоненту у системах підтримки прийняття рішень для бортових систем керування залізничного транспорту України. Визначено, що проходження криволінійної ділянки шляху на високій швидкості значно впливає на безпеку подальшого руху. У зв'язку з цим виявлення критичної швидкості є актуальним завданням та становить напрямок подальших досліджень.

**Ключові слова:** математична модель, система підтримки прийняття рішень, бортові системи керування, рухомий склад, коливальний процес, криволінійний рух, виляння, боковий винос.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Питання подальшого розвитку сучасної галузі вітчизняної залізниці щільно пов'язане з вирішенням наявних проблем, які пов'язані насамперед з експлуатацією залізничного транспорту: підвищення швидкості та безпеки руху, комфорту пасажирів, запобігання зношуванню залізничного шляху та компонентів рухомого складу. Однією з перешкод, що виникають на шляху вирішення означених проблем є загальний незадовільний стан залізничного полотна та більшості рухомих складів, що призводить до виникнення надмірних коливань та вібрацій залізничного транспорту під час руху [1]. Ці динамічні процеси, в свою чергу, призводять до подальшого погіршення стану рейок та рухомих компонентів поїзда, значного обмеження швидкості рухомого складу [2] та створюють загрозу виникнення непередбачуваних аварійних ситуацій.

З точки зору дії, яку коливання чинять на рух поїзда, найбільш впливовим є процес проходження рухомим складом криволінійної ділянки шляху [4]. Під час руху в кривих контакт колеса і рейки відбувається з ковзанням, що вже спричиняє зношування. Коливання виляння і бокового виносу, які є основними під час криволінійного руху, призводять до підвищених динамічних навантажень у контакті «колесо-рейка», збільшують ковзання і силу тертя, особливо на гребені колеса і бічній поверхні рейки, що значно прискорює знос як колісних пар, так і рейкової колії, що веде до збільшення витрат на обслуговування і ремонт інфраструктури [3]. Зокрема, динамічна нестійкість, яка проявляється у вигляді виляння, є одним з основних чинників, що обмежують максимальну швидкість руху поїздів [2]. Коливання також безпосередньо впливають на комфорт пасажирів. Зниження рівня вібрацій є важливим завданням під час експлуатації пасажирських поїздів [1]. Можливим шляхом пом'якшення негативного впливу коливань під час

криволінійного руху поїзда є розробка програмного компонента для бортової системи підтримки прийняття рішень, який дозволить оптимізувати рух на кривих ділянках шляху.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Криволінійний рух поїзда активно досліджується сучасними науковцями. Відзначається необхідність приділяти особливу увагу кривим, де динаміка рухомого складу змінюється найінтенсивніше, що вимагає точного моделювання взаємодії відцентрових сил, систем підвішування і контакту колеса з рейкою [3]. Досліджується вплив вібрацій та коливань, що виникають під час руху на криволінійній ділянці шляху, на подальший рух [4]. Розглядається вплив зміни швидкості при русі в кривій на виникаючі в процесі коливання [5, 6]. Проводяться дослідження перспектив підвищення загальної швидкості руху поїзда при поточному стані залізничного шляху [2, 6]. Підкреслюється необхідність моделювання процесу руху для його оптимізації та зменшення впливу коливань на механічні компоненти рухомого складу [7, 8].

Взаємодія геометрії кривої, профілів коліс і рейок, характеристик підвішування і динамічних коливань створює складну нелінійну систему. Поведінка поїзда в кривій стає менш передбачуваною за наявності значних коливань. Неконтрольовані коливання, особливо на високих швидкостях або в кривих малого радіуса, можуть значно збільшити ризик сходження рухомого складу з рейок. Розуміння і передбачення цих явищ необхідні для розроблення заходів щодо запобігання аваріям. Таким чином, дослідження криволінійного руху поїзда є важливим завданням у галузі залізничної техніки та експлуатації колії.

Комплексна математична модель дизель-поїзда має враховувати не тільки ті коливання, що виникають на прямолінійних ділянках шляху, але й ті, що пов'язані з рухом у кривій.

**Метою статті** є розробка математичної моделі руху дизель-поїзда, яка дозволить провести аналіз

руху поїзда на криволінійній ділянці шляху та будуть враховувати динамічні процеси, що виникають під час руху, такі як коливання вильняння та бокового вивіснення, для проведення подальших досліджень та використання у системах підтримки прийняття рішень бортових систем керування на залізничному транспорті України.

### Основна частина

Динамічні процеси, що відбуваються під час проходження екіпажом кривої ділянки колії, становлять особливий інтерес, оскільки поряд із раніше розглянутими процесами додаються нові. Це впливає, перш за все, з конструкції колії в кривих ділянках. У кривих ділянках влаштовують піднесення зовнішньої рейки для компенсації відцентрових сил поперечної складової від ваги. Крім того, за нормами утримання в крутих кривих створюють розширення колії для проходження колісних пар без заклинювання.

Традиційно для аналізу якості екіпажу розглядають стійкість на прямих ділянках і максимальні бічні сили в круговій кривій, отримані з умови сталого руху (вписування в криві). Для розгляду більш

загального випадку динамічної поведінки екіпажу необхідно враховувати зміну траєкторії колії та умови взаємодії коліс і рейок у довільній кривій.

Проведемо аналіз факторів, що впливають на проходження кривої ділянки колії. Кругова крива має ділянки сполучення з прямими на вході та виході за допомогою ділянок перехідних кривих. Зазвичай приймають лінійну залежність зміни кривизни і піднесення зовнішньої рейки в перехідній кривій.

Під час проходження кривої виникають значні поперечні та кутові переміщення візків щодо кузова. Сили і моменти, що повертають, а також сили тертя у зв'язках впливають на перерозподіл сил у системі підвішування.

У кривих ділянках колії внаслідок значних переміщень колісних пар у колії збільшуються швидкості ковзання коліс, що змінює умови взаємодії коліс із рейками (рис. 1). Дотичні сили взаємодії колеса і рейки в цьому випадку описуються на основі теорії нелінійного крипа.

Для крутих кривих характерний рух із набіганням коліс на рейки і виникненням напрямних сил на гребені.

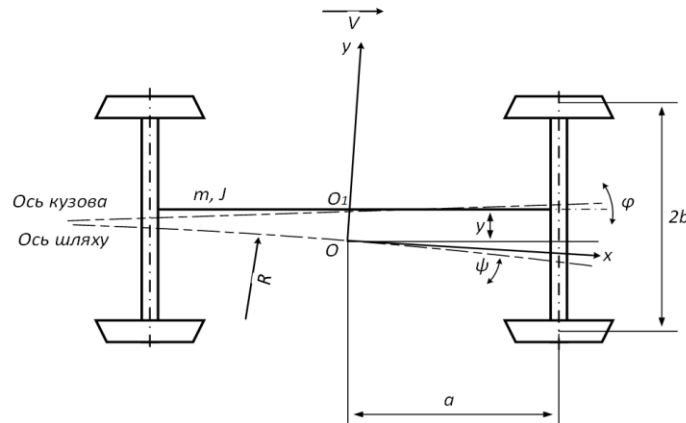


Рис. 1. Схема руху поїзда на кривій ділянці шляху

Під час руху екіпажу в довільній кривій, що має миттєве значення кривизни  $\rho(s)$ , виникає поздовжнє і поперечне ковзання. Поперечне ковзання колеса відносно рейки визначається переносною швидкістю  $V$  і різницею відносних швидкостей колеса і рейки. Для малих коливань, виражаючи через узагальнені координати, отримаємо швидкість поперечного ковзання коліс  $j$ -ї колісної пари.

$$u_y = \psi - \frac{1}{V} \left( \dot{y} + (-1)^{j+1} * a(\dot{\psi} + 0.5\dot{\psi}) \right) + (-1)^{j+1} * a * \rho(s),$$

де  $\psi$  – кут повороту візка відносно вертикальної осі, рад;  $V$  – швидкість руху, м/с;  $a$  – напівбаза візка, м.

Як видно з наведеної формули, для прийнятих припущень швидкості ковзання зовнішнього і внутрішнього колеса однієї колісної пари рівні між собою. Для першої та другої колісної пари знак одного зі доданків змінюється на протилежний, що враховується множителем  $(-1)^{j+1}$ . Поздовжнє ковзання визначається невідповідністю шляхів, що проходять колесами, які мають жорстку посадку на осі.

$$u_x = r_0^{-1} \cdot (y + (-1)^{j+1} * \psi * a) * \gamma + b_s \left( (1/V) * \dot{\psi} - \rho(s) \right),$$

де  $r_0$  – номінальний радіус бандажа по колу катання, м;  $y$  – поперечне переміщення центру мас візка, м;  $\gamma$  – показник конусності колісної пари,  $b_s$  – половина відстані між колами катання, м;  $\rho(s)$  – кривизна шляху. Як видно з наведених виразів, швидкість ковзання колеса рейкою залежить від узагальнених координат, від зміни радіусу кола кочення і від кута нахилу твірної профілю колеса. Дотична сила тертя в точці контакту колеса і рейки визначається в рамках нелінійної теорії крипу

$$F = K / \sqrt{1 + K_s^2 \cdot (u_x^2 + u_y^2)},$$

де  $K$  – коефіцієнт крипу,  $K_s$  – відносний коефіцієнт крипу. Проекції сили тертя запишемо у вигляді:

$$X = u_x \cdot F, \quad Y = u_y \cdot F.$$

Умови підключення гребеня до напрямку екіпажу запишемо у вигляді нелінійної функції поперечного переміщення колісної пари в колії.

$$Y_n = Cr * (y + \frac{1}{2} \cdot (|y - \sigma(s)| - |y + \sigma(s)|)),$$

де  $Cr$  – жорсткість рейки, кН/м;  $\sigma(s)$  – зазор колії.

Складемо рівняння коливань візка в кривій довільного радіуса:

$$\begin{cases} m\ddot{y} = 2 \cdot (Y_1 + Y_2) - Y_{n1} - Y_{n2} + (m + m_K) \cdot A_n; \\ I_Z \ddot{\psi} = C\varphi \cdot (a_k \cdot \rho(s) - \psi) - B \cdot \dot{\psi} + 2bs \times \\ \quad \times (-X_1 - X_2) + 2a(Y_1 - Y_2) + a(Y_{n2} - Y_{n1}). \end{cases}$$

Реалізація цієї математичної моделі дозволить провести низку експериментів та дослідити вплив швидкості руху поїзда під час проходження кривої на коливання. На рис. 2 та 3 наведено графіки зміни кута виляння та бокового виносу візка вагона рухомого складу в процесі проходження ним кривої з радіусом  $R = 600$  м на швидкості  $V \approx 80$  км/год при різних значеннях конусності колісної пари, де  $\gamma = 0,05$  – стандартна конусність,  $\gamma = 0,02$  – збільшена конусність  $\gamma = 0,08$  – зменшена конусність

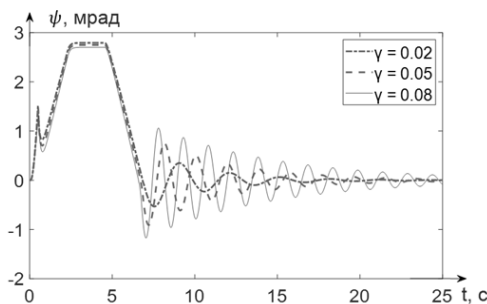


Рис. 2. Графік кута виляння візка вагона рухомого складу при різних показниках конусності

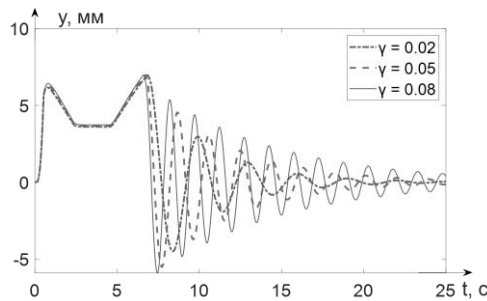


Рис. 3. Графік бокового виносу візка вагона рухомого складу при різних показниках конусності

На зображених графіках помітно, що зміна значення конусності колісної пари на проходження криволінійної ділянки колії впливає незначною мірою, однак водночас амплітуда та частота коливань, що виникають після проходження криволінійної ділянки колії, помітно збільшуються в разі зменшення конусності. На рис. 4, 5 наведено графіки зміни кута виляння та бокового виносу візка вагона рухомого складу в процесі проходження ним криволінійної ділянки колії на трьох різних швидкостях руху. Зображені криві відображають показники кута виляння і бічного виносу візка при швидкостях 30, 60, 90 км/год відповідно. На графіку зміни кута виляння візка вагона поїзда (рис. 4) видно, що збільшення значення швидкості руху поїзда спрощує проходження криволінійної ділянки колії – амплітуда коливань на цій ділянці зменшується.

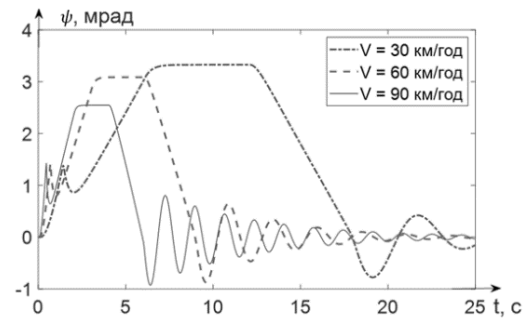


Рис. 4. Графік кута виляння візка вагона рухомого складу при різних показниках швидкості

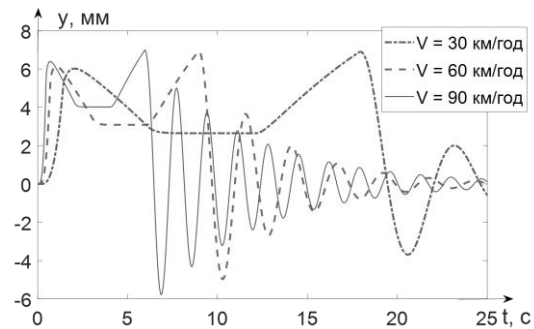


Рис. 5. Графік бокового виносу візка вагона рухомого складу при різних показниках швидкості

Однак при цьому амплітуда коливань, що виникають після проходження криволінійної ділянки колії, збільшуються при збільшенні швидкості. Водночас на графіку зміни бічного відносу візка вагона поїзда (рис. 5) видно, що збільшення значення швидкості руху поїзда практично не впливає на складність проходження криволінійної ділянки колії, проте водночас амплітуда та частота коливань, що виникають після проходження криволінійної ділянки колії, так само збільшуються зі збільшенням швидкості.

На рис. 6 наведено графіки зміни кута виляння та бокового виносу візка вагона рухомого складу в процесі проходження ним криволінійної ділянки шляху на швидкості 120 км/год.

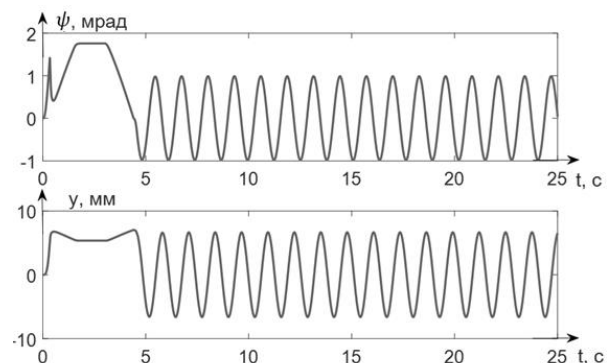


Рис. 6. Графік кута виляння та бокового виносу візка вагона рухомого складу при критичних показниках швидкості

На рис. 6 можна помітити, що під час проходження криволінійної ділянки колії на швидкості 120 км/год, амплітуда коливань, що виникають після

проходження криволінійної ділянки колії, стає постійною. Така швидкість називається критичною і є вагомим чинником у питанні оптимального керування поїздом. Таким чином, проходження криволінійної ділянки шляху на високій швидкості значно впливає на безпеку подальшого руху. У зв'язку з цим виявлення критичної швидкості є актуальним завданням та становить напрямок подальших досліджень.

### Висновки

В роботі розглянуто причини та наслідки виникнення надмірних коливань та вібрацій, особливості

та шкідливий вплив коливань, які виникають під час руху по криволінійній ділянці шляху. Наголошено на необхідності створення додаткового модулю для комплексної моделі поїзда, який дав би можливість проводити розрахунки пов'язані з рухом поїзда в повороті. Розроблена математична модель руху поїзда, яка дозволяє обчислення процесів виляння та бокового виносу під час криволінійного руху поїзда. Розроблена моделі можуть бути використані для проведення подальших досліджень та в якості програмних компонентів бортових комп'ютерних систем залізничного транспорту.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Грушевська Т. М. Стан рухомого складу як фактор і обмеження розвитку систем залізничних перевезень / Т. М. Грушевська // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Сер. : Транспортні системи і технології. - 2012. - Вип. 20. - С. 20-28. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpdetut\\_tsit\\_2012\\_20\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpdetut_tsit_2012_20_5)
2. M. B. Kurhan, D. M. Kurhan. Theoretical basis for the introduction of high-speed trains in Ukraine, Dnipro, 2016, 283 p
3. Garg, Vijay Kumar, and Rao V Dukkipati. Dynamics of Railway Vehicle Systems. New York: Academic Press, 1984
4. Zboinski, K.; Golofit-Stawinska, M. Dynamics of a Rail Vehicle in Transition Curve above Critical Velocity with Focus on Hunting Motion Considering the Review of History of the Stability Studies. Energies 2024, 17, 967. <https://doi.org/10.3390/en17040967>
5. Курган Н. Б. Критерії визначення допустимої швидкості руху в кривих // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2003. №2. С. 127-132.
6. Ковтун, Павло & Дубровська, Тетяна. (2018). ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF AN ABSOLUTE ACCELERATION ON THE SPEED OF MOVEMENT OF PASSENGER TRAINS. Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport. doi: 10.18664/1994-7852.181.2018.156307.
7. Jesús Otero Yugat, Jordi Martínez Miralles, María De los Santos. Analytical model of wheel-rail contact force due to the passage of a railway vehicle on a curved track. Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería Mecánica. Avenida Diagonal, 647. C.P. 08028. Barcelona, España.
8. Steišūnas, Stasys & Bureika, Gintautas & Gorbunov, Mykola. (2019). EFFECTS OF RAIL-WHEEL PARAMETERS ON VERTICAL VIBRATIONS OF VEHICLES USING A VEHICLE-TRACK-COUPLED MODEL. Transport Problems. 14. 27-40. DOI: 10.20858/tp.2019.14.3.3.

Received (Надійшла) 28.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.08.2025

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Євтушенко Олександр Сергійович** – аспірант кафедри "Комп'ютерна інженерія та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

**Oleksandr Yevtushenko** – PhD student, Department of Computer Engineering and Programming, National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute', Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [Oleksandr.Yevtushenko@cs.khpi.edu.ua](mailto:Oleksandr.Yevtushenko@cs.khpi.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3905-4375>.

**Заковоротний Олександр Юрійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Комп'ютерна інженерія та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

**Oleksandr Zakovorotnyi** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Engineering and Programming, National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute', Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [Oleksandr.Zakovorotnyi@khpi.edu.ua](mailto:Oleksandr.Zakovorotnyi@khpi.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-4415-838X>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57201613700>.

### Mathematical model of rolling stock oscillations on a curved track section for an on-board decision support system

Oleksandr Yevtushenko, Oleksandr Zakovorotnyi

**Abstract.** From the point of view of the effect that oscillations have on the train movement, the most influential is the process of passing a curved section of the track by the rolling stock. The article deals with the problems associated with dynamic processes during the movement of railway transport along curved sections of track. In particular, the paper analyses the wagging and lateral overrun oscillations, which have a significant impact on traffic safety, passenger comfort and the degree of wear of mechanical components. As a way to mitigate the problem of oscillations, the paper considers supplementing the decision support system with a new software component. As a result of the analysis of modern scientific research, a mathematical model of diesel train movement has been developed that takes into account the peculiarities of passing curved sections of the track. The model allows for the analysis of dynamic characteristics and can be used as a software component in decision support systems for on-board control systems of railway transport in Ukraine. It has been determined that the passage of a curved section of track at high speed significantly affects the safety of further traffic. In this regard, the identification of the critical speed is an urgent task and is the direction of further research.

**Keywords:** mathematical model, decision support system, on-board control systems, rolling stock, oscillatory process, curvilinear motion, wagging, side-swipe.

О. А. Єрошенко, М. П. Шиленко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ПРОЄКТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПІДСИЛЮВАЧА ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАМИ ДЛЯ СИСТЕМ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

**Анотація.** Предметом дослідження в статті є підсилювач сигналу електрокардіограми (ЕКГ), призначений для подальшої обробки псевдодиференціальним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) у системі комп'ютерного аналізу кардіосигналів. **Метою** роботи є синтез схеми підсилювача ЕКГ, розрахунок його ключових параметрів та імітаційне моделювання його роботи в програмному середовищі LTspice. В статті вирішуються наступні **завдання**: визначення природи шумів, що впливають на сигнал ЕКГ, розрахунок резистора, що визначає коефіцієнт підсилення схеми, побудова схеми підсилювача та її комп'ютерне моделювання. Використовуються такі **методи**: імітаційне моделювання процесів та технічних пристроїв; математичний аналіз нелінійних електронних схем (зокрема, схем на основі операційних підсилювачів); аналіз технічної документації виробників електронних компонентів; комп'ютерне імітаційне моделювання електронних схем. Отримано наступні **результати**: запропоновано схему підсилення сигналу ЕКГ, що сумісна з АЦП псевдодиференціального типу AD4010, виконано моделювання підсилювача сигналу ЕКГ в програмі LTspice. **Висновки**: Спроектований варіант схеми підсилення сигналу ЕКГ дозволяє прибирати синфазний шум з частотою 50 Гц та підсилює вхідний сигнал у 826 разів. Виконано моделювання схеми в програмному застосунку LTspice.

**Ключові слова:** інструментальний підсилювач, операційний підсилювач, АЦП, ЕКГ, синфазна перешкода, LTspice.

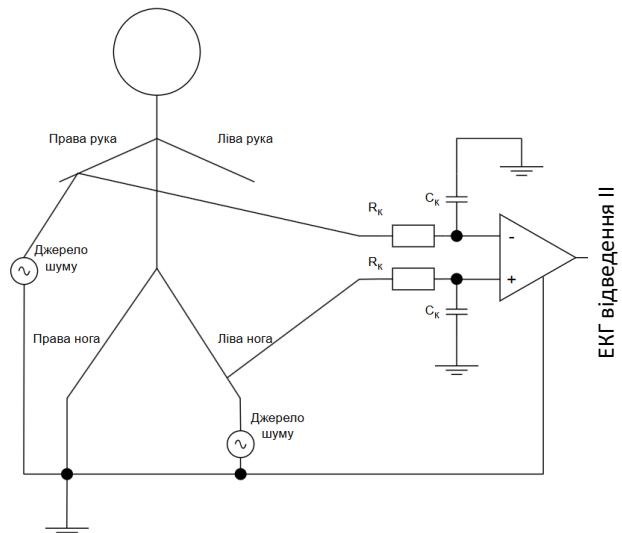
### Вступ

Електрокардіографія (ЕКГ) є стандартним інструментом клінічної діагностики серцево-судинних захворювань та моніторингу стану пацієнтів. У сучасній медичній практиці все ширше застосовуються комп'ютерні системи автоматичного аналізу ЕКГ, що підвищує вимоги до якості попередньої обробки сигналу. Особливу актуальність набуває задача проєктування підсилювальних каскадів, оптимізованих для роботи з псевдодиференціальними аналого-цифровими перетворювачами (АЦП). На відміну від повноцінних диференціальних АЦП, такі перетворювачі не сприймають від'ємну вхідну напругу, що вимагає додаткового зміщення сигналу в область додатних значень.

### Аналіз проблеми

При проєктуванні підсилювача сигналу ЕКГ потрібно врахувати шум, що передається через пацієнта в підсилювач (рис. 1), саме з метою придушення цього типу шуму використовується принцип диференціального підсилення, при якому на вхід підсилювача подається сигнал ЕКГ з двох електродів [1]. Фізіологічні особливості вимірювань призводять до того, що організм людини виступає в ролі антени, що приймає електромагнітні наведення від мережі електропостачання (50 Гц для Європи/Азії, 60 Гц для Північної Америки) та інші зовнішні електромагнітні перешкоди [1].

При проєктуванні системи важливим є врахування коефіцієнта подавлення синфазного сигналу (CMRR), який визначає здатність підсилювача до придушення зовнішніх перешкод. Для досягнення оптимального CMRR рекомендується комплексний підхід, що включає: щит Фарадея; якісну ізоляцію між землею приладу та землею пацієнта; фільтри типу KIX під час цифрової обробки сигналу; схему активного заземлення через праву ногу (RLD) [2, 3].



**Рис. 1.** Схема зняття другого відведення ЕКГ, що враховує шум та імпеданс кабелю у вигляді розподіленого RC-ланцюга

### Визначення вимог до підсилювача

Вимоги до підсилювача будуть ґрунтуватись виходячи з параметрів роботи застосованого АЦП (табл. 1) та з характеристик стандартної клінічної ЕКГ [4]:

- розмах сигналу ЕКГ в нормі дорівнює приблизно 1 мВ.
- внесення позитивної постійної складової до підсиленого сигналу ЕКГ обумовлена тим, що обраний АЦП не працює з негативним діапазоном напруг. В зібраній схемі, величина цієї постійної складової становить 1 В.
- при заданні коефіцієнта підсилення інструментального підсилювача потрібно врахувати постійну складову сигналу, щоб результуючий сигнал знаходився в межах діапазону псевдодиференціального аналогового входу [5].

Таблиця 1 – Характеристики мікросхеми AD4010

Найменування	Значення
Тип	Псевдодиференціальний
Роздільна здатність	18 біт
Наруга живлення	1,8 В
Діапазон опорної напруги, $V_{REF}$	2,4 ... 5,1 В
Діапазон псевдодиференціального аналогового входу	0 ... $V_{REF}$ В

### Інструментальний підсилювач AD8422 та обчислення коефіцієнту підсилення

В якості інструментального підсилювача було використано мікросхему AD8422 [6] виробника Analog Devices який вимагає одного резистора, що задає коефіцієнт підсилення в межах від 1 до 1000. AD8422 є третім поколінням розвитку галузевого стандарту — AD620. У мікросхемі AD8422 використані нові технології виробництва й методи проектування, що дозволили досягти вищого динамічного діапазону та нижчих похибок, ніж у попередників, при цьому споживання струму зменшено більш ніж утричі.

Підсилення сигналу за напругою ( $A_V$ ) розраховується за наступною формулою:

$$A_V = 1 + 19,8k\Omega/R_G,$$

Таблиця 2 – Часові характеристики мікросхеми AD4010

Параметр	Символ	Значення		
		Мін.	Тип.	Макс.
Час перетворення	$t_{CONV}$	270 нс	290 нс	320 нс
Час між перетвореннями	$t_{CYC}$	2000 нс	–	–
Затримка між подією на вході і появою значущого біта	$t_{EN}$	–	–	13 нс
Затримка від останнього спадаючого фронту SCK до наростаючого фронту CNV	$t_{QUIET2}$	60 нс	–	–

Таблиця 3 – Рекомендовані частоти тактування мікросхеми AD4010

Пропускна здатність	Мінімальна частота сигналу SCK
500 000 відліків/сек.	11 МГц
100 000 відліків/сек.	2 МГц

### Моделювання підсилювача сигналу ЕКГ та результати дослідження

На рис. 2 показана електрична схема підсилювача сигналу ЕКГ перед подачею на АЦП. На рис. 3 показана схема підключення АЦП, що приймає підсилений сигнал. Абревіатура ГТІ на рис. 3 розшифровується як генератор тактових імпульсів, що в цій схемі відповідає та генерування сигналу SCK. Найменування використаних мікросхем зведено у табл. 2, значення напруг джерел живлення, що були використані у схемі наведено у табл. 3.

Таблиця 2 – Перелік використаних мікросхем

Позначення на схемі	Назва
DA1	ADA4661-2
DA2	AD8422
DA3	ADA4625-2
DA4	ADA4625-1
DA5	LT6657-5
DA6	AD4010

де  $R_G$  – опір, що задає підсилення в межах від 1 до 1000. Експериментальним шляхом обрано значення резистору в 24 Ом, отже коефіцієнт підсилення дорівнює 826, що задовольняє вищезазначеним вимогам [7].

### Вимоги до частоти тактового сигналу SPI

Хоча цифровий інтерфейс AD4010 мінімізує частоту SCK, необхідну для зчитування результатів перетворення, навіть при роботі з високою пропускною здатністю, мінімальна частота сигналу SCK потрібна для коректного зчитування даних та залежить від кількості бітів, що зчитується з SDO.

Нижче наведена формула для обчислення мінімальної частоти SCK, що враховує нормальний режим роботи АЦП без застосування турбо-режиму:

$$f_{SCK} > \frac{N_D + N_S}{t_{CYC} - t_{CONV} - t_{EN} - t_{QUIET2}},$$

де  $t_{CYC}, t_{CONV}, t_{EN}, t_{QUIET2}$  – спеціальні часові константи значення яких наведено в табл. 2,  $N_D$  – розрядність АЦП;  $N_S$  – кількість бітів стану, до яких здійснюється доступ. Рекомендовані виробником частоти сигналу SCK для 3-дротового або 4-дротового режимів роботи наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Перелік використаних джерел живлення

Позначення на схемі	Номинал
G1	15 В
G2	1 В
G3	1,8 В
G4	6,5 В

На рис. 4 та 5 представлено результати моделювання електричної схеми підсилювача ЕКГ в програмному застосунку LTspice

Результати моделювання підтвердили працездатність схеми підсилення та дозволяють дотримуватись вищезазначеним вимогам.

На якість реєстрації ЕКГ впливає багато факторів, серед яких є низькочастотний шум руху пацієнта [8], що виникає через механічне зміщення електродів або зміни контакту шкіра-електрод під час руху, що призводить до змін локальних біоелектричних потенціалів.

Ці ефекти переважно асиметричні (тобто відрізняються для різних електродів) і мають низьку частоту (переважно в діапазоні 0.1–1 Гц). Для придушення шуму руху потрібні інші методи, серед яких використання високоякісних електродів і гелю, механічне закріплення електродів, або використання комп'ютерних методів виявлення і придушення дрейфу ізоляції.

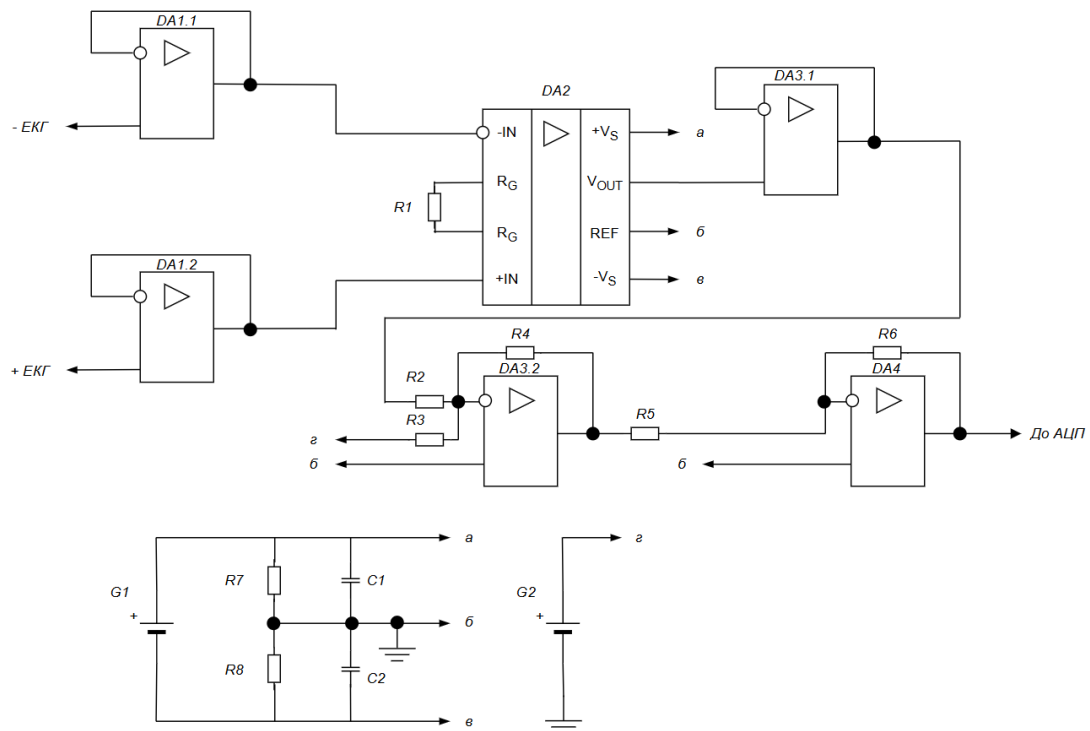


Рис. 2. Електрична принципова схема підсилювача сигналу ЕКГ

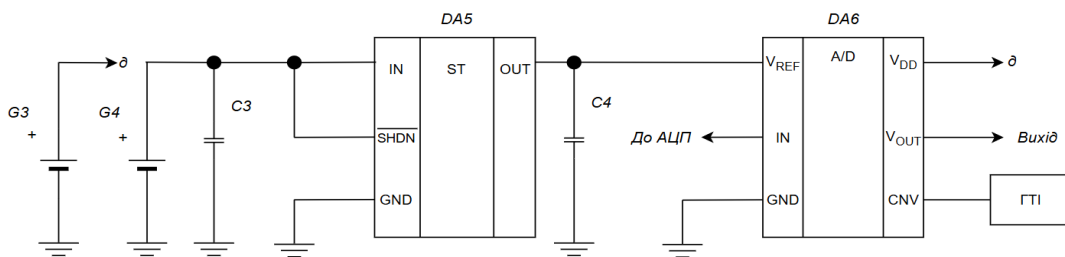


Рис. 3. Електрична принципова схема підключення АЦП для зчитування сигналу ЕКГ

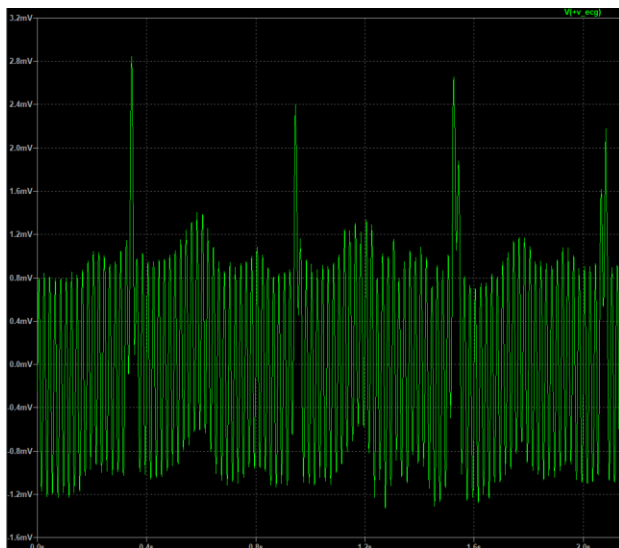


Рис. 4. Зображення вхідного сигналу ЕКГ з шумами

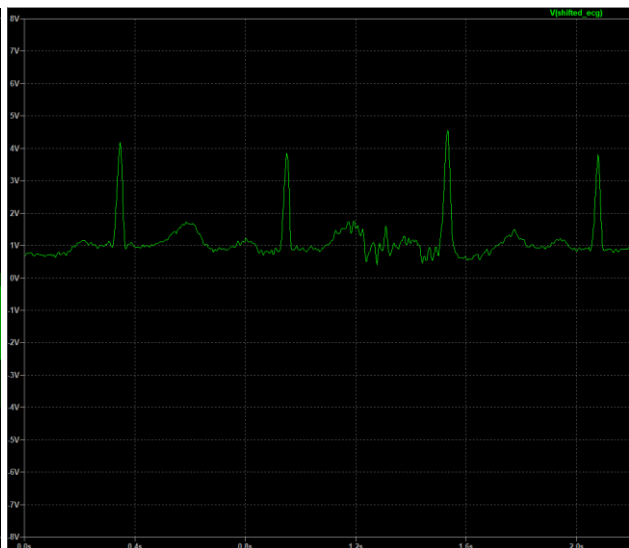


Рис. 5. Зображення підсиленого сигналу ЕКГ з позитивною постійною складовою

**Висновки**

У роботі розроблено та експериментально перевірено спеціалізований підсилювальний каскад для

обробки сигналів ЕКГ. Використано інструментальний підсилювач AD8422 з ключовими перевагами: високий CMRR (мінімальне значення 150 дБ при значенні коефіцієнта підсилення  $A_V = 1000$ ) [6];

низький вхідний шум та програмований коефіцієнт підсилення (1-1000).

Додавання вхідних буферів на базі мікросхеми ADA4661-2 обумовлено тим, що така конфігурація підвищує вхідний імпеданс схеми, що, в свою чергу, зменшує навантаження на джерело сигналу. Таким чином, високий вхідний імпеданс забезпечує більш точне відображення характеристик сигналу на вході схеми, що є актуальним параметром для роботи зі слабкими вхідними сигналами такими як ЕКГ.

Псевдодиференціальний АЦП AD4010 забезпечує на виході схеми забезпечує високу частоту

дискретизації, що може викликати навантаження на інтерфейс USB та програму, що зчитує сигнал.

В такому випадку пропонується зчитувати значення з АЦП за перериваннями, які можуть задаватись таймером, що задає більш низьку частоту дискретизації.

Плануються наступні поліпшення схеми: додання на вихід АЦП мікросхеми MCP2210, що виконує роль USB-SPI перетворювача; використання схеми з активним заземленням через праву ногу (Driven right leg circuit) для збільшення завадостійкості підсилювального каскаду.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дацок О.М., Прасол І.В., Єрошенко О.А. (2019), "Побудова біотехнічної системи м'язової електростимуляції", "Вісник НТУ "ХП". Серія: Інформатика та моделювання", № 13 (1338), С. 165-175, doi: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2019.13.15>
2. Barkovska O., Ni Ya., Navrashenko A., Peretiaka Ye., Romanenko A. (2025), "System for detecting critical human health conditions based on the analysis of physiological indicators", "Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць", Т 1, № 79, С. 143-149, doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.143-149>
3. Yeroshenko O., Prasol I., Datsok O. (2021), "Simulation of an electromyographic signal converter for adaptive electrical stimulation tasks", "Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries", № 1 (15). С. 113-119. doi: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.113>
4. Rangayyan R.M. (2015), "Biomedical signal analysis, Hoboken", NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., doi: <https://doi.org/10.1002/9781119068129>
5. Prasol I., Dovnar O., Yeroshenko O. (2023), "Method of diagnosing some diseases of the neuro-muscular system and features of data processing in software", "Technology Audit and Production Reserves", № 1(69), pp. 20-25, doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.273848>
6. AD8422 datasheet and product info | analog devices. *Mixed-signal and digital signal processing ICs | Analog Devices*. URL: <https://www.analog.com/en/products/ad8422.html> (дата звернення: 30.04.2025).
7. Царков Р. М., Єрмілов Р. О., Шефер О. В. (2025), "Використання високовольтних генераторів, керованих напругою, для підвищення точності систем фазового автопідстроювання частоти", "Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць", Т 1, № 79, С. 62-66, doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.62-66>
8. Main artifacts in electrocardiography - PMC. *PMC Home*. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6931710/> (дата звернення: 30.04.2025).

Received (Надійшла) 14.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.08.2025

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Єрошенко Ольга Артурівна** – доктор філософії, старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Olha Yeroshenko** – PhD, Senior Lecturer, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [olha.yeroshenko@nure.ua](mailto:olha.yeroshenko@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-6221-7158>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57808290700>.

**Шиленко Михайло Павлович** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Mykhailo Shylenko** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [mykhailo.shylenko@nure.ua](mailto:mykhailo.shylenko@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0009-4084-4711>.

#### Design and analysis of an electrocardiogram amplifier for digital signal processing systems

Olha Yeroshenko, Mykhailo Shylenko

**Abstract.** The subject of the article is an electrocardiogram (ECG) signal amplifier designed for further processing by a pseudo-differential analog-to-digital converter (ADC) in a computer analysis system of cardiac signals. **The purpose of the work** is to synthesize an ECG amplifier circuit, calculate its key parameters, and simulate its operation in the LTSpice software environment. The article solves the following **tasks**: determining the nature of noise affecting the ECG signal, calculating the resistor that determines the circuit gain, building the amplifier circuit, and its computer simulation. The following methods are used: simulation modeling of processes and technical devices; mathematical analysis of nonlinear electronic circuits (in particular, circuits based on operational amplifiers); analysis of technical documentation of manufacturers of electronic components; computer simulation modeling of electronic circuits. The following **results** were obtained: an ECG signal amplification circuit compatible with the pseudo-differential ADC AD4010 was proposed, and the ECG signal amplifier was simulated in the LTSpice program. **Conclusions:** The designed ECG signal amplification circuit allows for the removal of common-mode noise with a frequency of 50 Hz and amplifies the input signal by 826 times. The circuit was simulated in the LTSpice software.

**Keywords:** instrumentation amplifier, operational amplifier, ADC, ECG, common-mode noise, LTSpice.

А. М. Кльон<sup>1</sup>, А. В. Трет'як<sup>2</sup>, О. С. Фомін<sup>2</sup>, С. П. Ястреба<sup>3</sup>, А. С. Бурлаков<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Дніпро, Україна

<sup>2</sup> Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

<sup>3</sup> Полтавська філія Національного університету харчових технологій, Полтава, Україна

<sup>4</sup> Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ БЮДЖЕТНОЇ ЧОТИРИКОЛІСНОЇ РОБО-ПЛАТФОРМИ З ОПТИЧНИМИ ДАТЧИКАМИ РУХУ

**Анотація.** У роботі досліджено точність позиціонування мобільного робота, зібраного на базі бюджетної чотириколісної платформи з оптичними датчиками руху. Описано конструкцію мобільного робота, схему системи керування та методику визначення лінійних і кутових переміщень за допомогою одометрії. Проаналізовано основні та побічні похибки позиціонування, зокрема систематичні та випадкові складові. Проведено калібрування, яке включало апаратне балансування платформи, корекцію ШІМ-сигналів та уточнення одометричної моделі шляхом введення поправних коефіцієнтів. Побудовано логарифмічні апроксимації коефіцієнтів корекції для різних типів руху. Експериментальні результати підтвердили ефективність запропонованого підходу: відносні похибки позиціонування зменшилися в середньому у 2...4 рази. Зроблено висновки щодо подальших шляхів підвищення точності з урахуванням обмежень вартості апаратної бази.

**Ключові слова:** мобільний робот; позиціонування; одометрія; оптичні енкодери; похибка; калібрування; бюджетна робо-платформа.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Похибка позиціонування є однією з найважливіших характеристик, що визначає здатність робота виконувати покладені на нього завдання [1]. У контексті мобільних роботів похибка позиціонування — це відхилення фактичного положення робота від заданого програмою або оператором, що може вимірюватися в абсолютних або відносних одиницях.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Огляд сучасних технологій позиціонування мобільних роботів, зокрема SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), EKF (Extended Kalman Filter), UWB (Ultra-Wideband), IMU (Inertial Measurement Unit), VO (Visual Odometry) та інших наведено в роботах [2, 3]. Дослідження [4–6] присвячені експериментальній оцінці точності позиціонування та методам його підвищення. Вибір тієї чи іншої технології визначається умовами експлуатації, бюджетом та вимогами до точності.

**Метою статті** є визначення похибки позиціонування мобільного робота на базі бюджетної чотириколісної платформи з оптичними датчиками руху та розробка методів підвищення точності його позиціонування. Це дозволить оцінити можливості бюджетної мобільної платформи та визначити доцільність її застосування при реалізації тих чи інших робототехнічних проєктів.

### Виклад основного матеріалу дослідження

**Опис мобільного робота.** Для досліджень був зібраний мобільний робот, основні компоненти якого наведено в табл. 1. Його основою є бюджетна чотириколісна платформа вартістю \$6–10, що значною мірою визначає точність позиціонування. Платформа включає акриловий корпус, чотири двигуни постійного струму 6В із редукторами 1:48, кріпильні елементи та диски з прорізами для оптичних датчиків.

Замість штатного відсіку під 4 батарейки типу AA використано відсік для 2 акумуляторів типу 18650 (7,2В). Керування двигунами здійснюється драйвером на базі мікросхеми L298N. Для вимірювання переміщень використовуються оптичні датчики типу FC-03. Управління реалізовано на базі плати Arduino Leonardo R3 з мікроконтролером ATmega32u4. Прийом команд забезпечує Bluetooth-модуль HC-06. Дані з датчиків виводяться на OLED-дисплей 0.96" (128×64) з інтерфейсом I2C. Схему робота наведено на рис. 1, загальний вигляд — на рис. 2.

**Методика визначення переміщень.** У дослідженні використано основні положення одометрії [7], які дають змогу визначити положення та переміщення робота за допомогою енкодерів, що рахують кількість обертів коліс. Перевагами методу є простота реалізації та низька вартість. Серед недоліків — накопичення помилок (drift), вплив ковзання та прокручування коліс, що призводить до зростання похибки.







Для мобільного робота була написана програма керування, що працює за наступним принципом. Команди вводяться з мобільного пристрою за допомогою додатка Serial Bluetooth Terminal (або подібного) у вигляді цифри: 1 – рух прямо; 2 – рух назад; 3 – поворот праворуч; 4 – поворот ліворуч. За замовчуванням лінійне переміщення (прямо та назад) дорівнює 500 мм, кутовий поворот (вліво та вправо) – 90 градусів. Однак команда керування через крапку може мати другий аргумент – лінійне або кутове переміщення, задане у міліметрах або градусах (залезно від номеру команди). Наприклад, команда «1.750» відповідає переміщенню вперед на 750 мм, а команда «3.180» – повороту праворуч на 180 градусів. При цьому значення другого аргументу (величини переміщення) може бути довільним. Переміщення робота здійснюється по горизонтальній гладкій поверхні, яка встелена ватманом. Швидкість переміщення при скважності ШІМ 150 (із 255 можливих) стано-

вить приблизно 165 об/хв. Після переміщення на задану відстань, яка вимірюється імпульсами оптичних еncoderів, робот зупиняється, а на OLED-дисплей виводяться:

- розрахункова кількість імпульсів (Pulses), яка відповідає заданій відстані переміщення;
- фактична кількість імпульсів від еncoderів: FL – переднього лівого колеса, FR – переднього правого колеса, BL – заднього лівого колеса, BR – заднього правого колеса.

Повний код програми керування розміщений у репозиторії GitHub [8].

Таблиця 1 – Компоненти мобільного робота

№ з/п	Загальний вигляд	Назва
1		Робо-платформа 4х колісна двопалубна повнопривідна
2		Драйвер двигунів на базі чипа L298N
3		Оптичний датчик перешкоди FC-03
4		Дисплей 0.96" I2C 128x64 (жовто-синій) SSD1315
5		Bluetooth модуль HC-06
6		Плата Arduino Leonardo R3

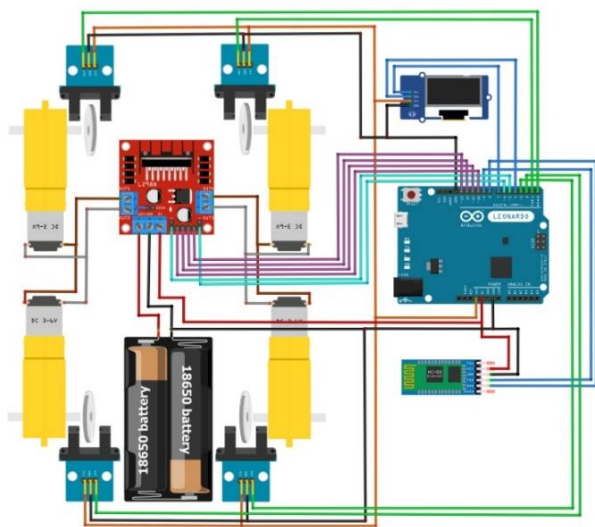


Рис. 1. Схема мобільного робота (виконана в програмі Fritzing)

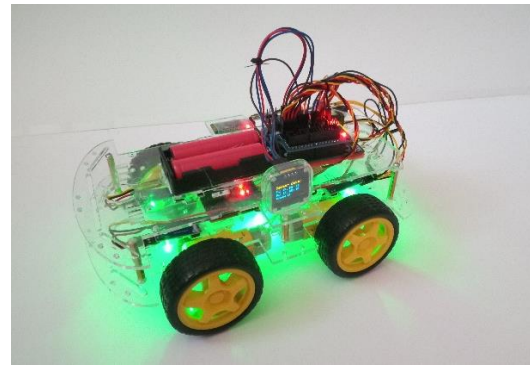


Рис. 2. Загальний вигляд мобільного робота

Розрахункова кількість імпульсів оптичного еncoderа визначається за відомими одометричними залежностями:

- для лінійного переміщення:

$$N_{\text{рл}} = \frac{S_{\text{р}} \cdot n}{D_{\text{к}} \cdot \pi}, \quad (1)$$

- для кутового переміщення:

$$N_{\text{рк}} = \frac{R_{\text{н}} \cdot \alpha_{\text{р}} \cdot n}{180 \cdot D_{\text{к}}}, \quad (2)$$

де  $S_{\text{р}}$  – величина необхідного лінійного переміщення, мм;  $D_{\text{к}} = 2R_{\text{к}}$  – діаметр колеса, мм (рис. 3, а);  $n$  – кількість прорізів диску оптичного датчика;  $R_{\text{н}}$  – радіус повороту, мм (рис. 3, б);  $\alpha_{\text{р}}$  – величина необхідного кута повороту, град.

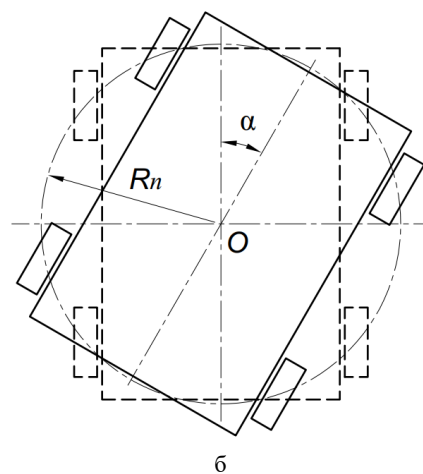
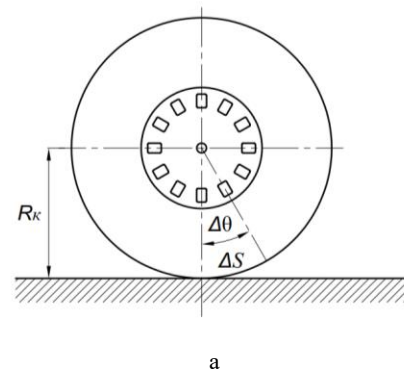


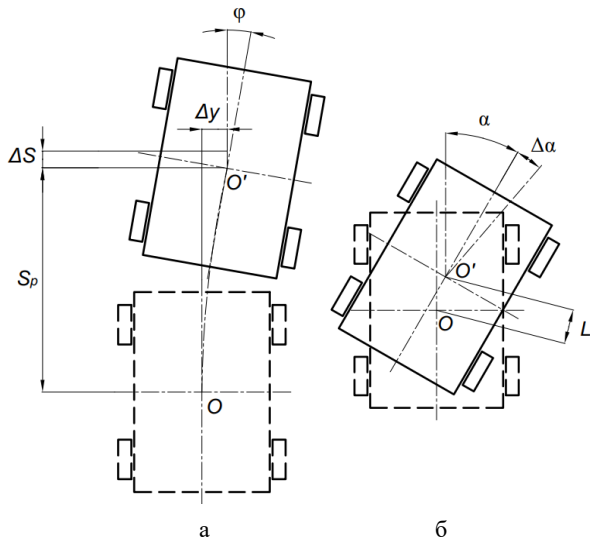
Рис. 3. Схеми до визначення розрахункової кількості імпульсів оптичних датчиків: а – при лінійному переміщенні; б – при повороті

**Аналіз похибок позиціонування.** Попередні тестування мобільного робота при лінійному переміщенні та повороті дозволили виявити похибки позиціонування, які можна умовно розбити на основні та побічні. Основні похибки – це відхилення від головного напрямку руху:  $\Delta S$  – при лінійному переміщенні та  $\Delta\alpha$  – при повороті (рис. 4). При цьому

$$\Delta S = |S_\phi - S_p|,$$

$$\Delta\alpha = |\alpha_\phi - \alpha_p|,$$

де  $S_\phi$  ( $\alpha_\phi$ ) – фактичне лінійне (кутове) переміщення, мм (град).



**Рис. 4.** Похибки позиціонування при лінійному переміщенні (а) і повороті (б)

До побічних похибок відносяться зміщення в бік від прямої лінії  $\Delta y$ , поворот на кут  $\phi$  при лінійному переміщенні та зміщення від центру повороту  $L$  при повороті. Своєю чергою, кожна з цих похибок має систематичну та випадкову складові.

Випадкові складові спричинені неконтрольованими факторами й підлягають лише фільтрації. Систематичні можуть бути зменшені шляхом калібрування.

Основні причини систематичних похибок:

- різна швидкість двигунів. В ідеалі швидкість лівих та правих коліс має бути однаковою (при лінійному русі напрямком обертання коліс однакової, при повороті – різній), але через різні ККД, знос та навантаження фактичні швидкості двигунів можуть дещо відрізнятися;

- механічні люфти та геометричні похибки мобільної платформи: наявність зазорів в механічних передачах, різний діаметр коліс (навіть декілька міліметрів грають роль), непаралельність півосей призводять до руху по дузі замість прямої при лінійному переміщенні та зміщення центру повороту при повороті;

- зміщення центру ваги мобільного робота відносно центра повороту призводить до несиметричного навантаження коліс, в результаті чого на колесах виникають різні сили тертя, а при повороті з'являються додаткові сили інерції;

- неточності у ШІМ-сигналі (PWM), особливо на низьких швидкостях: в Arduino-роботах ШІМ-керування не завжди лінійне.

**Калібрування.** Під калібрування мобільного робота розуміється процес виявлення та компенсації систематичних похибок у русі, щоб робот рухався максимально точно і передбачувано.

В рамках калібрування вжиті такі заходи:

- проведено комплексне балансування платформи, метою якого був рівномірний розподіл ваги робота на всі колеса, при цьому центр ваги був розташований максимально близько до центру повороту;

- програмним способом була дещо збільшена швидкість правих коліс при прямолінійному русі. Це пов'язано з тим, що робот замість прямої систематично слідував дугою, з ухилом праворуч. Головною причиною цього є механічні люфти та геометричні похибки мобільної платформи, такі як перекид коліс;

- проведена корекція одометричної математичної моделі, яка полягала у введенні поправних коефіцієнтів до формул (1) та (2):

$$N_{рл}^k = K_l \cdot N_{рл}, \quad (1')$$

$$N_{рк}^k = K_k \cdot N_{рк}, \quad (2')$$

де  $N_{рл}^k$  ( $N_{рк}^k$ ) – відкоригована розрахункова кількість імпульсів енкодера при лінійному переміщенні (повороті);  $K_l$  ( $K_k$ ) – коефіцієнт корекції при лінійному переміщенні (повороті):

$$K_l = S_p / S_\phi, \quad (3)$$

$$K_k = \alpha_p / \alpha_\phi. \quad (4)$$

Визначення коефіцієнтів корекції здійснювалось за такою методикою. Для лінійного переміщення були взяті 5 значень заданої відстані  $S_p$ : 250, 500, 750, 1000 та 1500 мм. Аналогічно, для кутового переміщення прийняті 5 заданих значень кута повороту: 45, 90, 180, 270 та 360 градусів. Для кожного з прийнятих значень проведені 10 вимірів та отримані відповідні значення фактичного переміщення  $S_\phi$  або  $\alpha_\phi$ .

На рис. 5 наведені бокс-діаграми коефіцієнтів  $K_l$  та  $K_k$  для прямолінійного руху та повороту, розрахованих за формулами (3), (4). Як видно з цих діаграм, коефіцієнти корекції змінюються залежно від відстані переміщення (лінійної чи кутової), отже є функціями, а не константами.

На рис. 6 наведені графіки логарифмічної апроксимації, побудовані на медіанних значеннях коефіцієнтів корекції  $K_l$  та  $K_k$ . Логарифмічна модель точно описує експериментальні залежності, коефіцієнт кореляції для лінійного руху становить 0,98, а для повороту – 0,67.

Функціональні залежності коефіцієнтів корекції мають вид:

- для лінійного переміщення:

$$K_l = f(S_p) = 0,0701 \cdot \ln(S_p) + 0,4383, \quad (5)$$

- для повороту:

$$K_k = f(\alpha_p) = 0,0216 \cdot \ln(\alpha_p) + 1,2138. \quad (6)$$

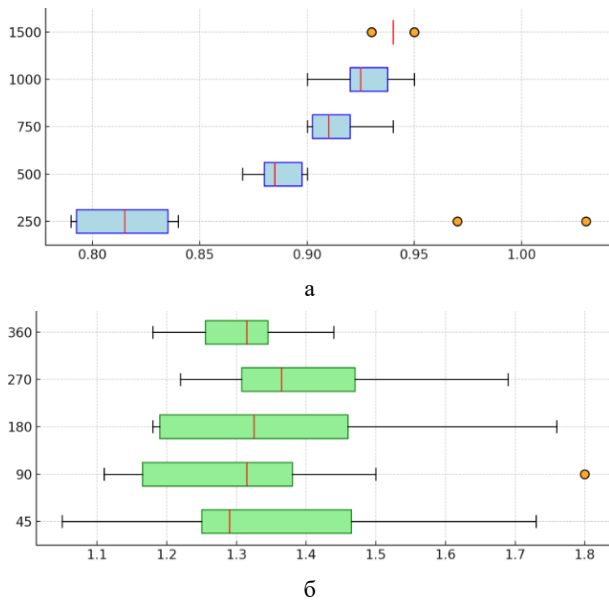


Рис. 5. Бокс-діаграми коефіцієнтів корекції  $K_L$  та  $K_K$  відповідно при прямолінійному русі (а) та повороті (б)

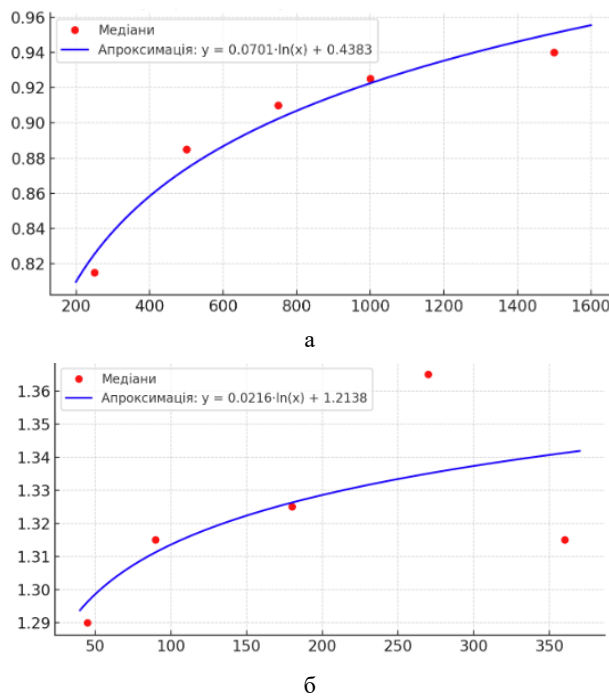


Рис. 6. Графіки логарифмічної апроксимації медіанних значень коефіцієнтів корекції при прямолінійному русі (а) та повороті (б)

Одержані залежності (5) та (6) відповідно до формул (1') та (2') враховані в програмі керування при обчисленні кількості імпульсів енкoderів, які відповідають заданій відстані переміщення: лінійній чи кутовій. Після цього була проведена друга серія експериментальних випробувань мобільного робота, в яких досліджувалась покращена точність його позиціонування.

**Результати досліджень.** Порівняльний аналіз показників точності позиціонування експериментальної платформи до та після калібрування проводиться за показниками відносної похибки: основної та побічної.

Основна відносна похибка розраховувалась за формулами:

- для лінійного переміщення:  

$$\Delta_S = \Delta S / S_p \cdot 100\%, \quad (7)$$

- для повороту:  

$$\Delta_\alpha = \Delta \alpha / \alpha_p \cdot 100\%. \quad (8)$$

Побічна відносна похибка:

- для лінійного переміщення:  

$$\Delta_y = \Delta y / S_p \cdot 100\%, \quad (9)$$

- для повороту:  

$$\Delta_L = 180 \cdot L / (\alpha_p \cdot \pi \cdot R_n) \cdot 100\%. \quad (10)$$

Порівняльний аналіз ілюструють графіки рис. 7–10. Криві, побудовані на всіх графіках, відповідають логарифмічній апроксимації медіанних значень відносної похибки.

На рис. 7 представлені графіки відносної основної похибки при лінійному переміщенні до та після калібрування. Обидві криві відображають тенденції зменшення значень зі зростанням відстані. Відносна похибка після калібрування зменшилась приблизно у 2 рази.

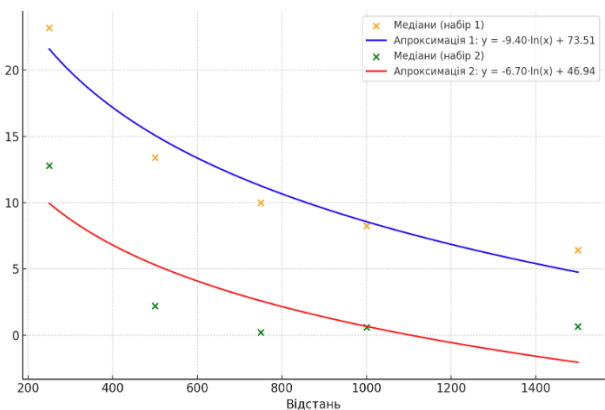


Рис. 7. Графіки відносної основної похибки при лінійному переміщенні (синя крива – до калібрування, червона крива – після)

На рис. 8 наведено графіки відносної побічної похибки при лінійному переміщенні.

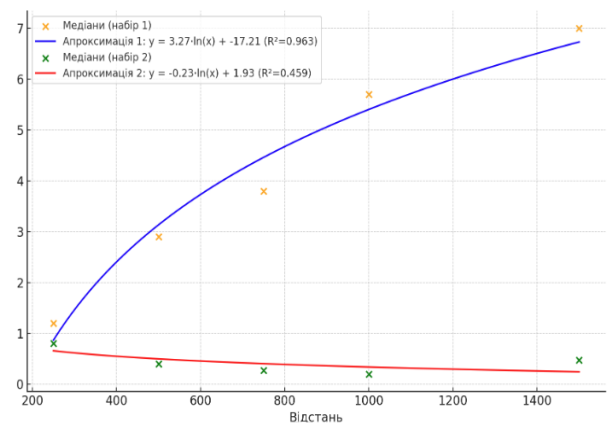


Рис. 8. Графіки відносної побічної похибки при лінійному переміщенні (синя крива – до калібрування, червона крива – після)

До калібрування побічна похибка мала чітку тенденцію збільшення, що пов'язано із рухом мобільного робота по дузі замість прямої. Після калібрування відносна похибка залишалась стабільною.

На рис. 9 представлені графіки відносної основної похибки при повороті. Обидві криві мало зале-

жать від кута повороту. Відносна похибка після калібрування зменшилась приблизно у 4 рази.

На рис. 10 наведено графіки відносної побічної похибки при повороті. До калібрування побічна похибка була стабільною, після калібрування – має тенденцію зменшення.

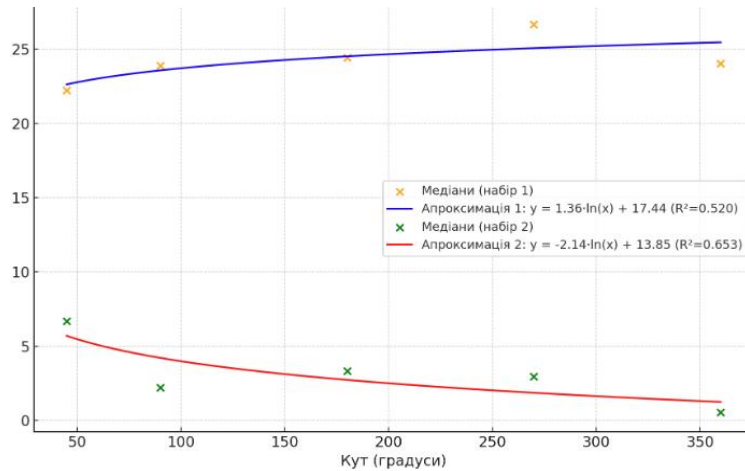


Рис. 9. Графіки відносної основної похибки при повороті (синя крива – до калібрування, червона – після)

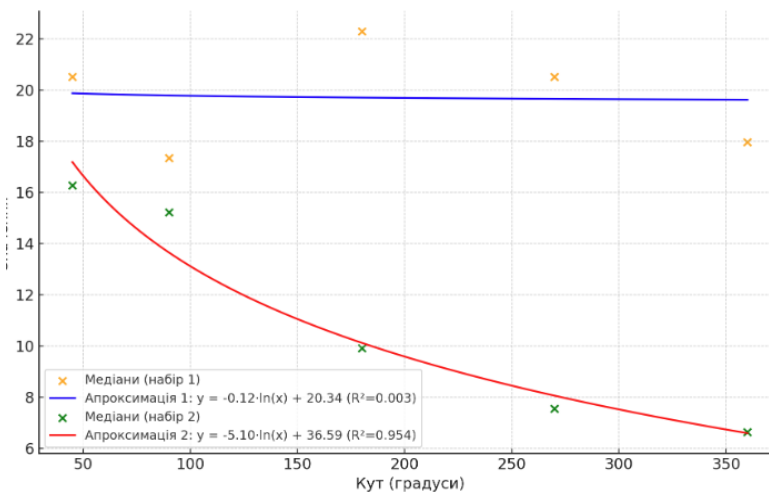


Рис. 10. Графіки відносної побічної похибки при повороті (синя крива – до калібрування, червона – після)

## Висновки

1. Мобільний робот, зібраний на базі бюджетних платформ, має типові похибки позиціонування, які умовно можна розбити на основні та побічні. Основні похибки – це відхилення від головного напрямку руху:  $\Delta S$  – при лінійному переміщенні та  $\Delta\alpha$  – при повороті. До побічних похибок відносяться зміщення в бік від прямої лінії  $\Delta u$ , поворот на кут  $\varphi$  при лінійному переміщенні та зміщення від центру повороту  $L$  при повороті.

2. Кожна з вказаних похибок має систематичну та випадкову складові. Випадкові складові пов'язані з багатьма факторами та практично не піддаються обліку. Систематичні похибки можна виявити та значною мірою усунути за допомогою калібрування.

3. Основними причинами похибок позиціонування, які піддаються коригуванню або компенсації,

є різна швидкість електродвигунів, механічні люфти та геометричні похибки мобільної платформи, зміщення центру ваги мобільного робота відносно центра повороту.

4. Розроблена методика калібрування дозволила значно підвищити точність позиціонування мобільного робота на базі бюджетної чотириколісної робо-платформи з оптичними датчиками руху. Експериментальні результати підтвердили ефективність запропонованого підходу: відносні похибки позиціонування зменшились в середньому у 2...4 рази.

5. Подальшими кроками підвищення точності позиціонування мобільного робота є застосування додаткових сенсорів, повторне калібрування, застосування більш складних програмно-апаратних адаптивних систем керування. Проте при розробці подібних заходів необхідно приймати до уваги

вартість робо-платформи. Якщо вимоги до точно- придбати більш якісну та вартісну робо- сті позиціонування є достатньо жорсткими, слід платформу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Трет'як А.В., Кльон А.М. Основи робототехніки: навчальний посібник для студентів спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Полтава: Нац. ун-т «Полтавська політехніка ім. Ю. Кондратюка», 2024. 135 с. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/17597/1/ОСНОВИ%20РОБОТОТЕХНІКИ%20.pdf>
2. Huang, J., Junginger, S., Liu, H., & Thurow, K. (2023). Indoor Positioning Systems of Mobile Robots: A Review. – Robotics, 12(2), 47. URL: <https://doi.org/10.3390/robotics12020047>
3. Jakub Semborski, Adam Idzkowski. A review on positioning techniques of mobile robots. – Robotic Systems and Applications, June 2024. Vol 4, Issue 1, PP 30-43. URL: <https://doi.org/10.21595/rsa.2024.23893>
4. Zhou, S., Li, Z., Lv, Z., Zhou, C., Wu, P., Zhu, C., & Liu, W. (2023). Research on Positioning Accuracy of Mobile Robot in Indoor Environment Based on Improved RTABMAP Algorithm. Sensors, 23(23), 9468. URL: <https://doi.org/10.3390/s23239468>
5. Khoshrangbaf, M., Akram, V. K., Challenger, M., & Dagdeviren, O. (2025). An Experimental Evaluation of Indoor Localization in Autonomous Mobile Robots. Sensors, 25(7), 2209. URL: <https://doi.org/10.3390/s25072209>
6. McLoughlin, B. J., Pointon, H. A. G., McLoughlin, J. P., Shaw, A., & Bezombes, F. A. (2018). Uncertainty Characterisation of Mobile Robot Localisation Techniques using Optical Surveying Grade Instruments. Sensors, 18(7), 2274. <https://doi.org/10.3390/s18072274>
7. Ben-Ari, M., Mondada, F. (2018). Robotic Motion and Odometry. In: Elements of Robotics. Springer, Cham. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62533-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62533-1_5)
8. Github-репозиторій дослідження з визначення похибки позиціонування бюджетної чотириколісної робо-платформи з оптичними датчиками руху. URL: <https://github.com/AndriyKlyon/Mobile-Robot---budget-4W-platform>

Received (Надійшла) 11.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.08.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Кльон Андрій Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Підйомно-транспортні машини і деталі машин», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Дніпро, Україна;

**Andriy Klyon** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of "Lifting and Transport Machines and Machine Elements", Higher Educational Institution "Pryazovskyi State Technical University", Dnipro, Ukraine; e-mail: [klyon\\_a\\_m@pstu.edu](mailto:klyon_a_m@pstu.edu); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-5105-0783>.

**Трет'як Андрій Валерійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;

**Andrii Tretiak** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Poltava, Ukraine; e-mail: [itm.Tretiak@nupp.edu.ua](mailto:itm.Tretiak@nupp.edu.ua) ; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3971-3078>.

**Фомін Олександр Сергійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;

**Olexandr Fomin** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Poltava, Ukraine; e-mail: [olexandr.fomin@nupp.edu.ua](mailto:olexandr.fomin@nupp.edu.ua) ; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0005-3487-9062>.

**Ястреба Сергій Петрович** - кандидат технічних наук, доцент, в.о. директора Полтавської філії Національного університету харчових технологій, Полтава, Україна.

**Sergiy Yastreba** - candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor Acting Director of the Poltava Branch of National University of Food Technologies, Poltava, Ukraine; e-mail: [jastrebasergey@ukr.net](mailto:jastrebasergey@ukr.net); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0000-1371-1985>.

**Бурлаков Анатолій Сергійович** – магістрант, кафедра електромеханіки, факультет електроенерготехніки та автоматизації, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», Київ, Україна;

**Anatolii Burlakov** – Master's student, Department of Electromechanics, Faculty of Electric Power Engineering and Automation, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute," Kyiv, Ukraine; e-mail: [brlkv.anatol@gmail.com](mailto:brlkv.anatol@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0008-1586-2339>.

**Evaluation of positioning accuracy for a low-cost four-wheeled mobile robot with optical motion sensors**

Andriy Klyon, Andrii Tretiak, Olexandr Fomin, Sergiy Yastreba, Anatolii Burlakov

**Abstract.** This paper investigates the positioning accuracy of a mobile robot built on a low-cost four-wheeled platform equipped with optical motion sensors. The design of the robot, the control system scheme, and the methodology for determining linear and angular displacements using odometry are described. Primary and secondary positioning errors are analyzed, including their systematic and random components. A calibration procedure was conducted, involving hardware weight balancing, PWM signal adjustments, and refinement of the odometric model through correction coefficients. Logarithmic approximations of the correction factors were constructed for different types of motion. Experimental results confirmed the effectiveness of the proposed approach: relative positioning errors were reduced on average by a factor of 2 to 4. Conclusions are drawn regarding further ways to improve positioning accuracy, taking into account the cost limitations of the hardware platform.

**Keywords:** mobile robot; positioning; odometry; optical encoders; error; calibration; low-cost robotic platform.

Л. В. Ларченко, Б. Д. Ларченко, Т. Г. Рожнова

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## МОДЕЛІ ПРОЕКТУВАННЯ БІТ-ПОТОКОВОГО ONLINE-ОБЧИСЛЮВАЧА ІРРАЦІОНАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ

**Анотація. Актуальність.** В розподілених системах управління реального часу необхідно забезпечувати безперервний прийом та обробку потоків інформаційних даних у міру їх надходження. При цьому актуальним завданням є створення поточкових обчислювачів, що виконують функціональне перетворення сигналів сенсорних компонентів, представлених у формі імпульсного потоку. **Метою роботи** є розробка математичної та автоматної моделей проектування поточкового online-обчислювача ірраціональних функцій з імпульсним (бітовим) потоком даних. **Об'єктом дослідження** є апаратні біт-поточкові обчислювачі ірраціональних функцій, основою яких є поточковий спосіб обчислень. **Предметом дослідження** є моделі та методи проектування біт-поточкових online-обчислювачів ірраціональних функцій. **Результати.** Запропоновано удосконалену математичну модель пристрою обчислення ірраціональної функції з використанням методу ступінчастої апроксимації на основі оберненої функції та автоматну модель обчислювача на основі кінцевого автомата Мура. **Висновок.** Використання запропонованих моделей проектування поточкового обчислювача дозволяє мінімізувати абсолютну похибку обчислень, підвищити ефективність проектування пристроїв за рахунок використання розроблених HDL-шаблонів опису моделі обчислювача.

**Ключові слова:** функціональне перетворення, бітовий потік даних, поточковий спосіб обчислень, апроксимація, математична модель, автоматна модель, граф переходів, граф-схема алгоритму, FPGA.

### Вступ

В розподілених системах управління реального часу необхідно забезпечувати безперервний процес прийому, обробки інформаційних даних та безперервне формування результату в процесі обробки. На даний час отримала розвиток концепція присенсорних обчислень, що передбачає переміщення обробки даних ближче до сенсорних компонентів [1]. При цьому широке застосування знаходять сенсори, що генерують вихідний сигнал у вигляді частотного, час-імпульсного або ШИМ сигналу. Частотний сигнал представляє собою потік імпульсів (бітів) з одиничною амплітудою, в якому інформативним параметром є фіксоване значення бітів за часовий інтервал [2].

Розробка спеціалізованих апаратних online-обчислювачів, що виконують функціональне перетворення сигналів за необхідною функцією з використанням поточкового способу обчислень є актуальним завданням. Поточковий спосіб обчислень передбачає одночасне паралельно-послідовне виконання перетворень над окремими бітами потоку, які здійснюються за рахунок використання методів формування пристроїв.

Для імплементації спеціалізованих функціональних модулів, що здійснюють присенсорні обчислення застосовуються технологічні платформи FPGA, CPLD спеціалізовані інтегральні мікросхеми ASIC, що забезпечують надійність, гнучкість та енергоефективність [3].

У роботі [4] обґрунтовано необхідність розробки перетворювачів для обчислень «поблизу сенсора» при використанні їх в децентралізованих сенсорних системах, показано алгоритми поточної обробки, які забезпечують одночасно функціональні перетворення сигналів, поданих у вигляді бітового потоку та потоку сигналу ШИМ.

В роботі [5] представлено принцип проектування та реалізацію тригонометричних функцій на FPGA з використанням алгоритму CORDIC. В [6] запропоновано архітектуру дільника, засновану на алгоритмі ділення, який використовує зворотну операцію, спираючись на алгоритм ділення Ньютона-Рафсона. При створенні нелінійних поточкових online-обчислювачів, що відтворюють нелінійні функції, використовують точні методи обчислення апроксимуючих функцій на основі диференціальних рівнянь або алгебраїчних рівнянь (обернених функцій).

У роботі [7] представлено математичну модель поточкового степеневого обчислювача з дробовим показником, що отримано на основі оберненої функції, запропоновано узагальнену архітектуру біт-поточкового online-обчислювача.

У [8] запропоновано апаратний біт-поточковий online-обчислювач дробово-раціональних функцій, математична модель якого побудована алгоритмічним шляхом у вигляді системи різницевих нерівностей.

В [9] запропоновано математичну модель поточкового обчислювача дробово-ірраціональних функцій, що здійснює двох етапне обчислення функції, математична модель якого представлена декомпозицією математичних моделей обчислювачів дробово-раціональних функцій та функції вилучення кореня.

**Метою роботи** є дослідження та розробка удосконаленої математичної моделі апаратного біт-поточкового обчислювача ірраціональних функцій, що дозволяє підвищити точність обчислень за рахунок використання методу формування пристроїв висхідних ступінчастих функцій на основі обернених функцій та підвищити швидкодію пристрою, за рахунок конвеєрної архітектури; розробка автоматної моделі пристрою на основі кінцевого автомата Мура, яка забезпечує чіткість реалізації алгоритму обчислень.

### Математична модель біт-потокowego обчислювача ірраціональних функцій

В [10] запропоновано метод формування приростів висхідних ступінчастих функцій на основі обернених функцій, що забезпечує мінімізацію похибки обчислень, яка складає  $\pm 0,5$  молодшого біта аргументу та єдиний підхід до проектування обчислювачів певного класу, які забезпечують формування результату обчислень в реальному часі.

При розробці обчислювачів увагу приділено простоті технічної реалізації за рахунок представлення аргументу функції у вигляді бітового потоку та універсальності використання архітектури з точки зору застосування пристроїв для виконання інших математичних операцій.

За методом формування приростів ступінчастих функцій на основі обернених функцій вибіркового значення  $x_y$  з вхідного бітового потоку  $x$ , що відповідають вузлам апроксимації відтвореної ступінчастої функції визначаються за наступною формулою:

$$\Psi(y - |\delta_{\max}|) \leq x_y < \Psi(y - |\delta_{\max}|) + 1, \quad (1)$$

де  $x, y$  – вхідний та вихідний бітові (імпульсні) потоки;  $\Psi(y - |\delta_{\max}|)$  – обернена функція.

Біт-потоківі обчислювачі ірраціональних функцій мають відтворювати на виході пристрою апроксимуючу функцію, що має вигляд:

$$y = \left[ \sqrt[q]{x} + 0,5 \right], \quad (2)$$

де  $|\delta_{\max}| = 0,5$  – граничне мінімальне значення абсолютної похибки відтворення функцій.

При розробці моделей проектування біт-потокowego online-обчислювача ірраціональних функцій було отримано математичну модель пристрою на основі оберненої функції.

Скориставшись формулою (1) для функції (2) отримано нерівність для визначення вибіркового значення  $x_y$ , що має бути реалізовано в online-обчислювачі:

$$2^q x_y \geq (2y_k - 1)^q. \quad (3)$$

Вибіркові значення  $x_y$  можуть бути визначені за формулою (3) при підстановці  $y_k = 1, 2, 3, \dots, k$ .

З нерівності (3) отримано математичну модель біт-потокowego обчислювача ірраціональних функцій, яка представляє собою систему різницевих нерівностей:

$$\begin{aligned} 2^q x_1 &\geq (2y_1 - 1)^q, \\ 2^q (x_2 - x_1) + \Delta_1 &\geq (2y_2 - 1)^q - (2y_1 - 1)^q, \\ 2^q (x_3 - x_2) + \Delta_2 &\geq (2y_3 - 1)^q - (2y_2 - 1)^q, \\ &\dots \\ 2^q (x_y - x_{y-1}) + \Delta_{y-1} &\geq (2y_k - 1)^q - (2y_{k-1} - 1)^q. \end{aligned} \quad (4)$$

В системі нерівностей (4)  $\Delta_{y-1}$  – це різниця, отримана при порівнянні поточних значень приростів функцій  $2^q x_y$  та  $(2y_k - 1)^q$  між двома сусідніми вузлами апроксимації відтворної функції, отриманої на попередньому кроці порівняння.

В системі нерівностей (4)  $\Delta_1$  та  $\Delta_{y-1}$  визначаються за відповідними формулами:

$$\Delta_1 = 2^q x_1 - (2y_1 - 1)^q, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{y-1} = 2^q (x_y - x_{y-1}) + \Delta_{y-2} - \\ - (2y_k - 1)^q + (2y_{k-1} - 1)^q. \end{aligned} \quad (6)$$

При виконанні кожної нерівності (4) на виході обчислювача буде генеруватися вихідний біт  $u_k$ , а отже, першому біту вихідного потоку  $y_l = 1$  відповідає біт  $x_l$ , що обирається з вхідного потоку  $x$ , при якому буде виконано першу нерівність (4). Для наступних бітів вихідного потоку  $u_k$  будуть виконані наступні нерівності (4) відповідно.

### Автоматна модель обчислювача

На основі узагальненої архітектури біт-потокowego online-обчислювача [7] може бути побудовано архітектуру потокowego обчислювача ірраціональних функцій з урахуванням математичної моделі пристрою заданої функції та базової конвеєрної архітектури потокowego поліноміального обчислювача. Архітектура обчислювача ірраціональних функцій є синтезом двох блоків: блок біт-потокowego обчислювача лінійної функції, що здійснює операцію множення вхідних бітів на константу при аргументі  $x$ ; блок конвеєрного обчислювача поліноміальних функцій, включений у зворотний зв'язок архітектури, побудований на каскадному з'єднанні суматорів, число яких дорівнює показнику ступеня ірраціональної функції.

Основний обчислювальний компонент архітектури – паралельний суматор результату SM\_RES зі зворотним зв'язком, в якому здійснюється порівняння паралельних кодів лівої і правої частин нерівностей математичної моделі обчислювача: ліва частина нерівності є значенням приростів гратчастої функції аргументу, які представлено прямим двійковим кодом; права частина нерівності є значенням приростів рівнів вузлів апроксимуючої функції, що представлена додатковим двійковим кодом.

Біти переповнення суматора SM\_RES є бітами початку формування кожної сходинки апроксимуючої ступінчастої функції.

Загальний підхід до апаратної реалізації online-обчислювачів на основі кінцевого автомата моделі Мура, що запропонований в [10], дозволив скористатись графом переходів для блоку керування обчислювальним процесом в online-обчислювачі ірраціональних функцій. Граф переходів керуючого автомата забезпечує чіткість і наочність керування обчислювальними станами пристрою.

Автоматна модель потокowego обчислювача ірраціональних функцій, що побудована на базі кінце-

вого автомату Мура є найбільш придатною для реалізації online-обчислювачів даного класу. Кінцевий автомат має дві складові – керуючий та операційний автомати.

Керуючий автомат обчислювача містить набір станів та переходів між ними (рис. 1).

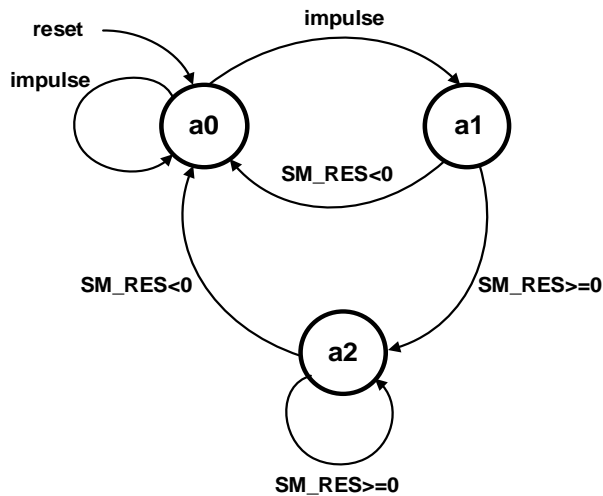


Рис. 1. Граф переходів керуючого автомату пристрою

Граф переходів містить три стани:  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ . По сигналу загального скиду пристрою  $reset=1$  автомат переходить у початковий стан  $a_0$ , та знаходиться у даному стані до того моменту, коли на вхід пристрою приходить сигнал «impulse», далі автомат переходить у стан  $a_1$ , в якому здійснюються обчислення у компонентах прямого зв'язку архітектури пристрою.

Переходи з одного стану в інший відбуваються на основі умов переповнення так/ні суматора  $SM\_RES$ . В  $a_2$  виконуються конвеєрні обчислення у компонентах зворотного зв'язку архітектури.

На підставі математичної моделі та архітектури біт-потокowego online-обчислювача розроблено змістовну граф-схему алгоритму (ГСА) операційного автомата реалізації ірраціональної функції, що приведено на рис. 2.

На основі створених графових моделей було розроблено HDL-модель обчислювача функції, що досліджується. В роботі [10] приведено результати експериментального дослідження розроблених моделей проектування біт-потокowego обчислювача ірраціональних функцій з відповідними теоретичними розрахунками на прикладі біт-потокowego обчислювача квадратичного радикалу, приведено атематичну модель пристрою, ГСА реалізації досліджуваної функції, створено HDL-модель пристрою, яка написана в стилі автоматного програмування, отримано поведінкову модель пристрою в середовищі САПР Active-HDL та здійснено його імплементацію в платформу FPGA Xilinx Spartan, оцінено частотні характеристики пристрою.

## Висновки

В результаті проведених авторами досліджень було обґрунтовано актуальність розробки поточкових

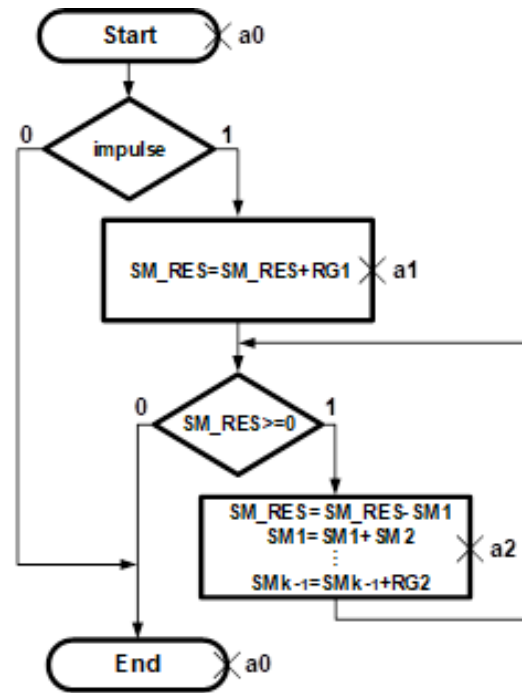


Рис. 2. Граф-схема алгоритму реалізації ірраціональної функції

online-обчислювачів для розподілених систем управління реального часу, що призначені здійснювати функціональну обробку сигналів сенсорних компонентів, представлених імпульсними потоками.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробці удосконаленої математичної моделі online-обчислювача ірраціональних функцій, яку отримано з використанням методу ступінчастої апроксимації на основі оберненої функції, а також у розробці автоматної моделі пристрою, що забезпечила чіткість виконання алгоритму реалізації ірраціональної функції.

Автоматну HDL-модель створено у вигляді автоматного шаблону, в якому достатньо коригувати HDL-опис операційного автомата обчислювача для реалізації обчислювачів довільного ступеня радикалу.

Практична цінність отриманих результатів полягає у розробці апаратної моделі ірраціонального обчислювача, яка сформована на основі кінцевого автомата моделі Мура, що дало можливість створити графові моделі обчислювача та HDL-модель пристрою для реалізації алгоритму відтворення ірраціональних функцій за допомогою інструментальних засобів САПР ПЛІС. Розроблені моделі проектування дозволяють підвищити ефективність проектування та скоротити час розробки online-обчислювачів даного класу.

Перспективи подальших досліджень передбачають використання запропонованих моделей у створенні поточкових обчислювачів дробово-ірраціональних функцій, що здійснюють двох етапне обчислення і розглянутий у даній роботі обчислювач може бути їх складовою частиною, що дозволяє розширити функціональні можливості досліджуваних пристроїв даного класу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhou F., Chai Y., (2020), "Near-sensor and in-sensor computing," Nature Electronics, Vol. 3 (11). pp. 664–671. doi:<https://doi.org/10.1038/s41928-020-00501-9>.
2. Shkil A. S., Larchenko L. V., and Larchenko B. D., (2020) "Bit-stream power function online computer", Proceedings of the IEEE East-west design & test symposium (EWDTS), pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/EWDTS50664.2020.9224764>
3. Sajjad M., Yusoff M. b. Z. and Ahmed M., (2020) "Design of Double-Precision Fully-Programmable Computational Unit for FPGA and ASIC," International Conference on Computing, Electronics & Communications Engineering (iCCECE), Southend, UK, , pp. 21-26.
4. Bureneva O., Mironov S., Safyannikov N., Sukhinets Zh. (2023) "Functional Converter for Intelligent Sensor and Its Layout Design. Engineering Proceedings", 33(1):50. <https://doi.org/10.3390/engproc2023033050>.
5. Kumar P. A., (2019) "FPGA implementation of the trigonometric functions using the CORDIC algorithm", Proceedings of the 5th International conference on Advanced computing & communication systems (ICACCS), pp. 894-900, doi: 10.1109/ICACCS.2019.8728315.
6. Rodriguez-Garcia, L. Pizano-Escalante, R. Parra-Michel, O. Longoria-Gandara and J. Cortez, (2013) "Fast fixed-point divider based on Newton-Raphson method and piecewise polynomial approximation," International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs (ReConFig), Cancun, Mexico, pp. 1-6, doi: 10.1109/ReConFig.2013.6732291.
7. Korniienko V., Larchenko L., Parkhomenko A., Larchenko A., (2023) "Design Models of Bit-Stream Online-Computers of Elementary Mathematical Functions," 12th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Sep. 2023, Dortmund, Germany, pp. 585-589.
8. Ларченко Б.Д., Шкіль О.С., Ларченко Л.В., Філіппенко І.В., Ющенко С.В. (2020) "Апаратний біт-потоківий online обчислювач дробово-раціональних функцій", Радіоелектроніка та інформатика, № 3., С. 55-63..
9. Шкіль О.С., Ларченко Б.Д., Ларченко Л.В., (2019) "Декомпозиція математичної моделі апаратного біт-потоківого обчислювача ірраціональних функцій", Радіоелектроніка та інформатика, №4, С. 46-52.
10. Larchenko L.V., Parkhomenko A.V., Larchenko B.D., Korniienko V.R., (2024) "Design Models of Bit-Stream Online-Computers for Sensor Components," Radio Electronics, Computer Science, Control, vol. 1(68), pp. 48-61, <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-1-6>.

Received (Надійшла) 14.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.08.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Ларченко Ліна Вікторівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Lina Larchenko** – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: [lina.larchenko@nure.ua](mailto:lina.larchenko@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-4326-1601>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57194415994>.

**Ларченко Богдан Дмитрович** – кандидат технічних наук, асистент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Bogdan Larchenko** – PhD, Assistant of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: [bogdan.larchenko@gmail.com](mailto:bogdan.larchenko@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-1298-4567>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57219986279>.

**Рожнова Тетяна Григорівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Tetiana Rozhnova** – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: [tetiana.rozhnova@nure.ua](mailto:tetiana.rozhnova@nure.ua), ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-4484-8674>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=35763451400>.

**Design models of bit-stream irrational function online-computer**

Lina Larchenko, Bogdan Larchenko, Tetiana Rozhnova

**Abstract. Topicality.** Currently, in distributed real-time control systems it is necessary to ensure continuous reception and processing of information data streams as they arrive. In this case, the current task is to create stream computers that perform functional conversion of signals of sensor components, presented in the form of a pulse stream. **The purpose of this work** is to develop mathematical and automata design models for a bit-stream online-computer of irrational functions with a pulse (bit) data stream. **The object of research** is hardware bit-stream computers of irrational functions, the basis of which is the streaming method of calculations. **The subject of the study** are models and methods for designing bit-stream online-computers of irrational functions. **Results.** An improved mathematical model of a device for calculating irrational functions using the stepwise approximation method based on inverse functions and an automatic model of the computer based on Moore's finite state machine are proposed. **Conclusion.** The use of the proposed design models of a streaming computer allows minimizing the absolute error of calculations and increasing the efficiency of device design through the use of developed HDL templates for describing the computer model.

**Keywords:** functional transformation, bit stream of data, streaming method of calculations, approximation, mathematical model, automaton model, transition graph, algorithm graph-scheme, FPGA.

Г. В. Хаханова, І. В. Хаханова, В. І. Обрізан, О. Ю. Шевченко, Г. К. Кулак

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## СИНТЕЗ ДЕДУКТИВНИХ ФОРМУЛ ДЛЯ ЛОГІЧНИХ ПРИМІТИВІВ

**Анотація.** **Актуальність.** Дедуктивний аналіз цифрових систем і компонентів є найбільш ефективним інструментом синтезу тестів, оцінки їх якості та діагностики несправностей в режимі реального часу. Суть дедуктивного моделювання полягає у використанні синтезованих цифрових підсхем, які є необхідним апаратним доповненням до початкового функціоналу, призначеним для транспортування вхідних списків несправностей на зовнішні виходи. Підсхеми, реалізовані програмно або апаратно, в кілька разів перевищують корисний функціонал. Тому ефективність використання дедуктивного аналізу слід розглядати з позицій підвищення продуктивності, зниження витрат на обладнання і інтегрального часу на проектування цифрової системи і вихід на ринок електронних технологій. **Метою** дослідження є скорочення часу на моделювання несправностей логічних схем на основі синтезу дедуктивних функцій. **Об'єкт дослідження** – моделювання несправностей в цифрових системах та компонентах. **Предметом дослідження** є дедуктивний аналіз цифрових систем і компонентів. **Результати.** У ході дослідження проаналізовано основні проблеми, що супроводжують сучасне моделювання несправностей. Розглянуто тенденції новітніх методів моделювання. З метою побудови секвенсора моделювання дефектів, що є інваріантним до вхідних тестових наборів, синтезовано дедуктивні формули транспортування вхідних списків несправностей на зовнішні виходи для X-функцій від скінченної кількості змінних. Запропоновано структуру дедуктивного симулятора логічних X-функцій. Проаналізовано переваги дедуктивного симулятора логічних X-функцій.

**Ключові слова:** modeling, simulation, несправність, дедуктивне моделювання, Fault Simulation, векторна логіка, комбінаційна логічна схема, верифікація, тестування.

### Вступ

Інтерес до моделювання несправностей визначається безперервними проблемами ринку електроніки, пов'язаними з дефектами технічних виробів різного призначення: обчислювальної техніки, транспорту, медицини, будівництва, космонавтики, озброєння, енергетики. Загальну картину цієї області можна представити взаємодією моделей, методів і дефектів [1-3]. Різноманіття складових в області моделювання несправностей досконально вивчено вченими за останні 60 років, що знайшло відображення в численних публікаціях [4-6]. Окремі статті останніх років присвячені створенню нових моделей і методів моделювання, які є наслідком появи нових обчислювальних апаратних рішень і технологій, оснащених штучним інтелектом, хмарними сервісами і квантовими структурами даних. Поліпшення покриття несправностей за допомогою наборів тестів на реальні дефекти є важливою проблемою в області НВІС [7-9]. Якість моделі несправностей фактично впливає на валідність тестових послідовностей. Модель SAF (Constant Faults) довгий час відіграла провідну роль у цифрових схемах, але дослідження показують, що існує багато інших дефектів, які не можуть бути покриті підмножиною SAF. У зв'язку з цим в останні роки постійно пропонуються нові моделі несправностей (затримки, короткі замикання, розриви, функціональні несправності IDDQ), методи моделювання та алгоритми для нанометрових цифрових виробів.

**Метою** дослідження є скорочення часу на моделювання несправностей логічних схем на основі синтезу дедуктивних функцій.

### Основна частина

Розглянемо дедуктивні функції для паралельного моделювання списків несправностей при вичерпному тесті для функціональних елемента I, АБО,

ІІ. У загальному випадку генератор дедуктивних функцій можна подати як секвенсор (рис. 1).

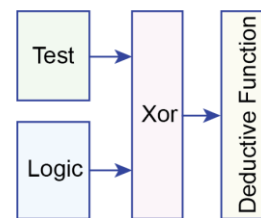


Рис. 1. Секвенсор для синтезу дедуктивних функцій

Дедуктивний перетворювач для функції AND можна отримати так:

$$\begin{aligned}
 L[T = (00,01,10,11), F = (X_1 \wedge X_2)] &= \\
 &= L\{(\bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_2 \vee x_1 x_2) \wedge \\
 &\wedge [(X_1 \oplus T_{t1} \wedge X_2 \oplus T_{t2}) \oplus T_{t3}]\} = \\
 &= (\bar{x}_1 \bar{x}_2)\{[(X_1 \oplus 0) \wedge (X_2 \oplus 0)] \oplus 0\} \vee \\
 &\vee (\bar{x}_1 x_2)\{[(X_1 \oplus 0) \wedge (X_2 \oplus 1)] \oplus 0\} \vee \\
 &\vee (x_1 \bar{x}_2)\{[(X_1 \oplus 1) \wedge (X_2 \oplus 0)] \oplus 0\} \vee \\
 &\vee (x_1 x_2)\{[(X_1 \oplus 1) \wedge (X_2 \oplus 1)] \oplus 1\} = \\
 &= (\bar{x}_1 \bar{x}_2)(X_1 \wedge X_2) \vee (\bar{x}_1 x_2)(X_1 \wedge \bar{X}_2) \vee \\
 &\vee (x_1 \bar{x}_2)(\bar{X}_1 \wedge X_2) \vee (x_1 x_2)(X_1 \wedge X_2).
 \end{aligned}$$

Обчислення для функції OR виконуються аналогічним чином:

$$\begin{aligned}
 L[T = (00,01,10,11), F = (X_1 \vee X_2)] &= \\
 &= L\{(\bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_2 \vee x_1 x_2) \wedge \\
 &\wedge [(X_1 \oplus T_{t1} \vee X_2 \oplus T_{t2}) \oplus T_{t3}]\} = \\
 &= (\bar{x}_1 \bar{x}_2)\{[(X_1 \oplus 0) \vee (X_2 \oplus 0)] \oplus 0\} \vee \\
 &\vee (\bar{x}_1 x_2)\{[(X_1 \oplus 0) \vee (X_2 \oplus 1)] \oplus 1\} \vee \\
 &\vee (x_1 \bar{x}_2)\{[(X_1 \oplus 1) \vee (X_2 \oplus 0)] \oplus 1\} \vee \\
 &\vee (x_1 x_2)\{[(X_1 \oplus 1) \vee (X_2 \oplus 1)] \oplus 1\} = \\
 &= (\bar{x}_1 \bar{x}_2)(X_1 \vee X_2) \vee (\bar{x}_1 x_2)(\bar{X}_1 \wedge X_2) \vee \\
 &\vee (x_1 \bar{x}_2)(X_1 \wedge \bar{X}_2) \vee (x_1 x_2)(X_1 \wedge X_2),
 \end{aligned}$$

де  $T_t = (T_{t1}, T_{t2}, T_{t3})$ ,  $t = \overline{1,4}$  – тест-вектор від трьох координат, де остання з них визначає стан виходу двовходового елемента AND (OR), L – вихідний список несправностей, X – список несправностей на

конкретному вході примітиву,  $x = \{0,1\}$  – логічне значення на вході примітиву.

Наведена нижче аналітична процедура визначає дедуктивну формулу для транспортування списків несправностей через інвертор. Тут  $T_t = (T_{t1}, T_{t2})$ ,  $t = \overline{1,2}$  – тест-вектор двох координат, де друга – стан виведення примітиву:

$$\begin{aligned} L[T = (0,1), F = \bar{X}_1] &= L\{(\bar{x}_1 \vee x_1)[(\bar{X}_1 \oplus T_{t1}) \oplus T_{t2}]\} = \\ &= \bar{x}_1[(\bar{X}_1 \oplus 0) \oplus 1] \vee x_1[(\bar{X}_1 \oplus 1) \oplus 0] = \\ &= \bar{x}_1 \bar{X}_1 \vee x_1 \bar{X}_1 = \bar{x}_1 X_1 \vee x_1 X_1. \end{aligned}$$

Отриманий результат свідчить про інваріантність інверсії до вхідного набору для транспортування дефектів, що трансформуються в ретранслятор. Тому ця функція не відображається на виходах дедуктивних елементів. Для двухвходових AND, OR елементів спільна апаратна реалізація дедуктивних функцій подана в вичерпному тесті універсальною схемою дедуктивно-паралельного аналізу несправностей (рис. 2), де  $(x1, x2)$  – вхідні булеві змінні,  $(X1, X2)$  – регістрові змінні для зберігання списків відмов у вигляді векторів,  $V$  – змінна для вибору типу справної функції (AND, OR),  $Y$  – вихідна регістрова змінна, де якій накопичуються транспортовані дефекти.

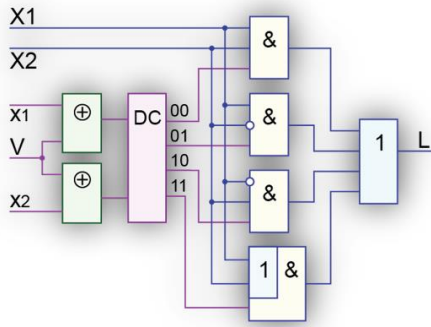


Рис. 2. Симулятор несправностей примітивів

Стани двійкових входів  $x1, x2$  і змінна вибору елемента визначають одну з чотирьох дедуктивних функцій для отримання вектора  $Y$  перевірюваних несправностей схеми.

Синтез дедуктивної моделі логічної функції XOR, що має унікальну властивість транспортувати вхідні списки несправностей, на всіх вхідних тестових послідовностях виконується наступним чином:

$$\begin{aligned} L[T = (00,01,10,11), F = X_1 \oplus X_2 = (X_1 \bar{X}_2 \vee \bar{X}_1 X_2)] &= \\ &= L\{(\bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_2 \vee x_1 x_2) \wedge [(\bar{X}_1 \oplus T_{t1})(\bar{X}_2 \oplus T_{t2}) \vee \\ &\quad \vee (\bar{X}_1 \oplus T_{t1})(X_2 \oplus T_{t2})] \oplus T_{t3}\}: \\ L(T_0 = 00) &= (\bar{x}_1 \bar{x}_2) \wedge [(X_1 \oplus 0)(\bar{X}_2 \oplus 0) \vee \\ &\quad \vee (\bar{X}_1 \oplus 0)(X_2 \oplus 0)] \oplus 0] = (\bar{x}_1 \bar{x}_2) \wedge [(X_1 \bar{X}_2 \vee \bar{X}_1 X_2)]; \\ L(T_1 = 01) &= (\bar{x}_1 x_2) \wedge [(X_1 \oplus 0)(\bar{X}_2 \oplus 1) \vee \\ &\quad \vee (\bar{X}_1 \oplus 0)(X_2 \oplus 1)] \oplus 1] = \\ &= (\bar{x}_1 x_2) \wedge [(X_1 X_2) \vee (\bar{X}_1 \bar{X}_2)] \oplus 1] = \\ &= (\bar{x}_1 x_2) \wedge [(\bar{X}_1 \vee \bar{X}_2) \wedge (X_1 \vee X_2)] = (\bar{x}_1 x_2) \wedge (X_1 \bar{X}_2 \vee \bar{X}_1 X_2); \\ L(T_2 = 10) &= (x_1 \bar{x}_2) \wedge [(X_1 \oplus 1)(\bar{X}_2 \oplus 0) \vee \\ &\quad \vee (\bar{X}_1 \oplus 1)(X_2 \oplus 0)] \oplus 1] = \\ &= (x_1 \bar{x}_2) \wedge [(\bar{X}_1 \bar{X}_2) \vee (X_1 X_2)] \oplus 1] = \\ &= (x_1 \bar{x}_2) \wedge [(X_1 \vee X_2) \wedge (\bar{X}_1 \vee \bar{X}_2)] = (x_1 \bar{x}_2) \wedge (X_1 \bar{X}_2 \vee \bar{X}_1 X_2); \\ L(T_3 = 11) &= (x_1 x_2) \wedge [(X_1 \oplus 1)(\bar{X}_2 \oplus 1) \vee \\ &\quad \vee (\bar{X}_1 \oplus 1)(X_2 \oplus 1)] \oplus 0] = \\ &= (x_1 x_2) \wedge [(\bar{X}_1 X_2) \vee (X_1 \bar{X}_2)] \oplus 0] = \\ &= (x_1 x_2) \wedge (X_1 \bar{X}_2 \vee \bar{X}_1 X_2). \end{aligned}$$

Синтез показав однаковий вигляд всіх дедуктивних формул на чотирьох вхідних тестових множинах. Можна зробити висновок про інваріантність XOR-функції до вхідних тестових множин, тобто будь-яке вхідне слово має одну єдину дедуктивну формулу

$$\begin{aligned} L(\text{xor}) &= (\bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_2 \vee x_1 x_2) \wedge [(X_1 \bar{X}_2 \vee \bar{X}_1 X_2) = \\ &= (xx) \wedge [(X_1 \bar{X}_2 \vee \bar{X}_1 X_2)]. \end{aligned}$$

За допомогою функції "виключне OR" завжди можна об'єднати списки вхідних несправностей на виході елемента XOR, окрім випадку, коли списки є ідентичними. У цьому випадку на виході логічного елемента хог не буде перевірятися жодна несправність. Нижче наведено синтез дедуктивної формули для еквівалентності, що також має єдину універсальну дедуктивну формулу для всіх вхідних тестових впливів:

$$\begin{aligned} L[T = (00,01,10,11), F = X_1 \equiv X_2 = X_1 X_2 \vee \bar{X}_1 \bar{X}_2] &= \\ &= L\{(\bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_2 \vee x_1 x_2) \wedge [(\bar{X}_1 \oplus T_{t1})(X_2 \oplus T_{t2}) \vee \\ &\quad \vee (\bar{X}_1 \oplus T_{t1})(\bar{X}_2 \oplus T_{t2})] \oplus T_{t3}\}: \\ L(T_0 = 00) &= (\bar{x}_1 \bar{x}_2) \wedge [(X_1 \oplus 0)(X_2 \oplus 0) \vee \\ &\quad \vee (\bar{X}_1 \oplus 0)(\bar{X}_2 \oplus 0)] \oplus 1] = \\ &= (\bar{x}_1 \bar{x}_2) \wedge [(X_1 X_2) \vee (\bar{X}_1 \bar{X}_2)] \oplus 1] = \\ &= (\bar{x}_1 \bar{x}_2) \wedge [(X_1 \bar{X}_2 \vee \bar{X}_1 X_2)]; \\ L(T_1 = 01) &= (\bar{x}_1 x_2) \wedge [(X_1 \oplus 0)(X_2 \oplus 1) \vee \\ &\quad \vee (\bar{X}_1 \oplus 0)(\bar{X}_2 \oplus 1) \oplus 0] = \\ &= (\bar{x}_1 x_2) \wedge [(X_1 \bar{X}_2) \vee (\bar{X}_1 X_2)] \oplus 0] = \\ &= (\bar{x}_1 x_2) \wedge (X_1 \bar{X}_2 \vee \bar{X}_1 X_2); \\ L(T_2 = 10) &= (x_1 \bar{x}_2) \wedge [(X_1 \oplus 1)(X_2 \oplus 0) \vee \\ &\quad \vee (\bar{X}_1 \oplus 1)(\bar{X}_2 \oplus 0)] \oplus 0] = \\ &= (x_1 \bar{x}_2) \wedge [(\bar{X}_1 X_2) \vee (X_1 \bar{X}_2)] \oplus 0] = \\ &= (x_1 \bar{x}_2) \wedge (X_1 \bar{X}_2 \vee \bar{X}_1 X_2); \\ L(T_3 = 11) &= (x_1 x_2) \wedge [(X_1 \oplus 1)(X_2 \oplus 1) \vee \\ &\quad \vee (\bar{X}_1 \oplus 1)(\bar{X}_2 \oplus 1) \oplus 1] = \\ &= (x_1 x_2) \wedge [(\bar{X}_1 \bar{X}_2) \vee (X_1 X_2)] \oplus 1] = (x_1 x_2) \wedge [(X_1 \bar{X}_2 \vee \bar{X}_1 X_2)]. \end{aligned}$$

Таким чином, функції еквівалентності (NOT-XOR) також властива унікальна здатність транспортувати вхідні списки несправностей, які не залежать від вхідного впливу, на вихід логічної функції:

$$\begin{aligned} L(\text{not-xor}) &= (\bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_2 \vee x_1 x_2) \wedge [(X_1 \bar{X}_2 \vee \bar{X}_1 X_2)] = \\ &= (xx) \wedge [(X_1 \bar{X}_2 \vee \bar{X}_1 X_2)]. \end{aligned}$$

Показано, що дедуктивні формули для двох різних логічних функцій XOR і NOT-XOR ідентичні між собою. Суттєвим є висновок про те, що будь-який тестовий вплив для цифрового пристрою, який складається з цих логічних вентилів, перевіряє 50% одиничних константних несправностей, що є інверсними до справного стану вхідних ліній. Для перевірки наявності усіх несправностей вхідної лінії, слід подати на схему лише два взаємно обернені тестові набори. Слід виконати порівняння трьох форм опису логічних функцій: таблиці істинності (ТТ – Truth Table) – табл. 1, диз'юнктивна нормальна форма (DF – Disjunctive Form), кубітний вектор або Q-покриття (QC – Qubit Coverage):

$$\begin{aligned} Y(\text{DF}) &= Y(\text{DF}) = \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 \vee \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 \vee X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 \vee X_1 X_2 X_3; \\ Y(\text{QC}) &= 01101001. \end{aligned}$$

Кубітне покриття – це вектор станів виводу логічної функції, впорядкованих за зростанням двійкових адрес або вхідних множин таблиці істинності. Q-покриття – це явна і найбільш компактна форма опису поведінки логічної функції, яка має такі переваги перед табличною і аналітичною формами:

Таблиця 1 – Таблиця істинності TT

	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y
	0	0	0	0
	0	0	1	1
	0	1	0	1
Y(TT) =	0	1	1	0
	1	0	0	1
	1	0	1	0
	1	1	0	0
	1	1	1	1

1) Q-вектор вимагає в n разів менше пам'яті для зберігання даних в порівнянні з таблицею істинності;

2) Q-вектор не вимагає n<sup>2</sup> складних обчислювальних процедур, необхідних для визначення вихідного стану логічної функції за диз'юнктивною нормальною формою;

3) Характеристичне рівняння для аналізу кубітного покриття містить тільки адресні операції читання-запису: M<sub>i</sub>=Q<sub>i</sub>[M(X<sub>i</sub>)], що мають високий паралелізм та лінійну обчислювальну складність.

З урахуванням викладеного вище щодо переваг кубітних покриттів, пропонується синтез дедуктивної формули для більш складної логічної схеми, що представляє собою функцію хог з трьох змінних, що має кубітне покриття: (01101001). Для аналітичного виразу зазначеної функції

$$f(Q = 01101001) = \bar{X}_1\bar{X}_2X_3 \vee \bar{X}_1X_2\bar{X}_3 \vee X_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee X_1X_2X_3$$

нижче наведена побудова дедуктивної формули для транспортування списків вхідних несправностей на зовнішній вихід:

$$\begin{aligned} L(T_0 = 000) &= (\bar{X}_1\bar{X}_2X_3 \vee \bar{X}_1X_2\bar{X}_3 \vee X_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee X_1X_2X_3); \\ L(T_1 = 001) &= (\bar{X}_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee \bar{X}_1X_2X_3 \vee X_1\bar{X}_2X_3 \vee X_1X_2\bar{X}_3) \oplus 1 = \\ &= (\bar{X}_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee \bar{X}_1X_2X_3 \vee X_1\bar{X}_2X_3 \vee X_1X_2\bar{X}_3) = \\ &= (\bar{X}_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \wedge \bar{X}_1X_2X_3 \wedge X_1\bar{X}_2X_3 \wedge X_1X_2\bar{X}_3) = \\ &= (X_1 \vee X_2 \vee X_3)(X_1 \vee \bar{X}_2 \vee \bar{X}_3)(\bar{X}_1 \vee X_2 \vee \bar{X}_3)(\bar{X}_1 \vee \bar{X}_2 \vee X_3) = \\ &= (X_1 \vee X_2\bar{X}_3 \vee \bar{X}_2X_3) \wedge (\bar{X}_1 \vee X_2X_3 \vee \bar{X}_2\bar{X}_3) = \\ &= \bar{X}_1\bar{X}_2X_3 \vee \bar{X}_1X_2\bar{X}_3 \vee X_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee X_1X_2X_3. \end{aligned}$$

На всіх інших тестових наборах (010, 011, 100, 101, 110, 111) логічна X-функція

$$f = \bar{X}_1\bar{X}_2X_3 \vee \bar{X}_1X_2\bar{X}_3 \vee X_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee X_1X_2X_3$$

має аналогічний вираз дедуктивної формули, що дорівнює вихідній X-функції. Таким чином, функція X, що задається кубітним покриттям (01101001) на всіх тестових наборах, має дедуктивну формулу для транспортування вхідних списків несправностей, яка дорівнює вихідній функції:

$$\begin{aligned} L(T = xxx) &= f(X_1, X_2, X_3) = \\ &= (\bar{X}_1\bar{X}_2X_3 \vee \bar{X}_1X_2\bar{X}_3 \vee X_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee X_1X_2X_3). \end{aligned}$$

Для доведення повноти дослідження наводиться побудова дедуктивної формули для транспортування списків вхідних несправностей для другої X-функції з трьох змінних:

$$\begin{aligned} f(Q = 10010110) &= \bar{X}_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee \bar{X}_1X_2X_3 \vee X_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee X_1X_2\bar{X}_3; \\ L(T_0 = 000) &= (\bar{X}_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee \bar{X}_1X_2X_3 \vee X_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee X_1X_2\bar{X}_3) \oplus 1 = \\ &= (\bar{X}_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee \bar{X}_1X_2X_3 \vee X_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee X_1X_2\bar{X}_3) = \\ &= \bar{X}_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \wedge \bar{X}_1X_2X_3 \wedge X_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \wedge X_1X_2\bar{X}_3) \wedge \\ &\wedge (X_1 \vee X_2 \vee X_3) \wedge (X_1 \vee \bar{X}_2 \vee \bar{X}_3) \wedge (\bar{X}_1 \vee X_2 \vee \bar{X}_3) \wedge (\bar{X}_1 \vee \bar{X}_2 \vee X_3) = \\ &= (X_1 \vee X_2\bar{X}_3 \vee \bar{X}_2X_3) \wedge (\bar{X}_1 \vee X_2X_3 \vee \bar{X}_2\bar{X}_3) = \\ &= \bar{X}_1\bar{X}_2X_3 \vee \bar{X}_1X_2\bar{X}_3 \vee X_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee X_1X_2X_3; \\ L(T_1 = 001) &= (\bar{X}_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee \bar{X}_1X_2X_3 \vee X_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee X_1X_2\bar{X}_3) \oplus 0 = \\ &= (\bar{X}_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee \bar{X}_1X_2X_3 \vee X_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee X_1X_2\bar{X}_3); \\ L(T = xxx) &= \bar{X}_1\bar{X}_2X_3 \vee \bar{X}_1X_2\bar{X}_3 \vee X_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee X_1X_2X_3. \end{aligned}$$

Виявилось, що обидві X-функції (01101001, 10010110) з трьох змінних мають однаковий дедуктивний вираз для транспортування вхідних списків несправностей на вихід функції, інваріантний до вхідних тестових наборів і рівний ДДНФ функції, що має кубітне покриття (01101001):

$$\begin{aligned} L(T = xxx, Q = 01101001 \vee 10010110) &= \\ &= \bar{X}_1\bar{X}_2X_3 \vee \bar{X}_1X_2\bar{X}_3 \vee X_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee X_1X_2X_3. \end{aligned}$$

Істотним є факт, що X-функція n змінних, яка ототожнюється з хог-примітивом, є єдиною, де логічна і дедуктивна функції рівні між собою на будь-якому вхідному двійковому наборі. Зокрема, для трьох змінних рівняння виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned} f(01101001) &= L(01101001) = \\ &= \bar{X}_1\bar{X}_2X_3 \vee \bar{X}_1X_2\bar{X}_3 \vee X_1\bar{X}_2\bar{X}_3 \vee X_1X_2X_3 = X_1 \oplus X_2 \oplus X_3. \end{aligned}$$

Структура моделювання справної поведінки і дедуктивного моделювання несправностей X-функції на основі використання регістрових операцій подана на рис. 3.

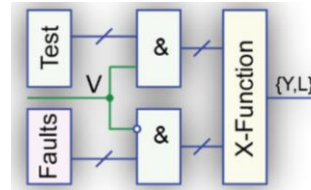


Рис. 3. Дедуктивний симулятор X-функцій

### Висновки

З метою побудови секвенсора моделювання дефектів, що є інваріантним до вхідних тестових наборів, синтезовано дедуктивні формули транспортування вхідних списків несправностей на зовнішні виходи для X-функцій від скінченної кількості змінних. Запропоновано структуру дедуктивного симулятора логічних X-функцій, який має наступні переваги:

1) відсутність традиційної апаратної надмірності для дедуктивного моделювання несправностей X функцій, тоді як будь-які інші логічні функції вимагають у 8-10 разів збільшення апаратної частини;

2) використання для обробки вхідних впливів двох автоматних тактів, які орієнтовані на справне моделювання і дедуктивний аналіз несправностей відповідно;

3) використання паралельних логічних операцій для ефективного транспортування вхідних списків несправностей.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hahanov, V., Gharibi, W., Chumachenko, S., and Litvinova E. (V2024), "Vector Synthesis of Fault Testing Map For Logic", *IAES International Journal of Robotics and Automation*, vol. 13, no. 3, pp. 293-306, doi [10.11591/ijra.v13i3.pp293-306](https://doi.org/10.11591/ijra.v13i3.pp293-306).

2. Gharibi W. Vector-logic computing for faults-as-address deductive simulation IAES International Journal of Robotics and Automation. – 2023. – Т. 12. – №. 3. – С. 274-288. DOI: 10.11591/ijra.v12i3.pp274-288
3. Хаханов В.І. Дедуктивний аналіз та діагностування логічних X-функцій / В.І Хаханов, І.В. Ємельянов, М.М. Любарський, С.В. Чумаченко, С.І. Литвинова, Л.В. Ларченко // Радіоелектроніка та інформатика. – 2018. – №1. – С.55-63.
4. E.J. Marinissen, Yervant Zorian, "Guest Editors' Introduction: The Status of IEEE Std 1500", In *IEEE Design & Test of Computers*, no 26(1), pp.6-7, 2009.
5. M. Abramovici, *Digital System Testing and Testable Design*, Comp. Sc. Press, 1998.
6. H. Fujiwara, "Fault Simulation," In the book "*Logic Testing and Design for Testability*", MIT Press, pp.84-108, 1985.
7. R. Ubar, J. Kõusaar, M. Gorev and S. Devadze, "Combinational fault simulation in sequential circuits," In *2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Lisbon, pp. 2876-2879, 2015.
8. T. Hosokawa, H. Takano, H. Yamazaki, K. Yamazaki, "A Diagnostic Fault Simulation Method for a Single Universal Logical Fault Model," In *2017 IEEE 22nd Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing (PRDC)*, Christchurch, pp. 217-218, 2017.
9. C. Dhiliban, S. Govindaraju, "Fault simulation and analysis of VLSI circuit using n-detect test sets," *2016 Online Int. Conf. on Green Engineering and Technologies*, Coimbatore, pp. 1-5, 2016.

Received (Надійшла) 14.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.08.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Хаханова Ганна Володимирівна** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харків, Україна;

**Hanna Khakhanova** – Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [anna.hahanova@nure.ua](mailto:anna.hahanova@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-4528-6861>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8326375900>.

**Хаханова Ірина Віталіївна** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харків, Україна;

**Irina Hahanova** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [irina.hahanova@nure.ua](mailto:irina.hahanova@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-8319-0430>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24479469700>.

**Обрізан Володимир Ігорович** – кандидат технічних наук, докторант кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харків, Україна;

**Volodymyr Obrizan** – Candidate of Technical Sciences, Post Doctoral Student of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [vladimir.obrizan@nure.ua](mailto:vladimir.obrizan@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-1835-4056>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=15127546800>.

**Шевченко Ольга Юріївна** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харків, Україна;

**Olga Shevchenko** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [olga.shevchenko@nure.ua](mailto:olga.shevchenko@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-8122-4748>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57217113510>.

**Кулак Георгій Костянтинівич** – асистент, аспірант кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Heorhii Kulak** – assistant, PhD student, Design Automation Department, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [heorhii.kulak@nure.ua](mailto:heorhii.kulak@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0008-7685-5909>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57336874000>.

**Synthesis of Deductive Formulas for Primitives**

Anna Hahanova, Irina Hahanova, Vladimir Obrizan, Olga Shevchenko, Heorhii Kulak

**Abstract. Relevance.** Deductive analysis of digital systems and components is the most effective tool for test synthesis, assessing their quality, and diagnosing faults in real time. The essence of deductive modeling is to use synthesis digital subcircuits, which are a necessary hardware addition to the initial functionality, designed to transport incoming fault lists to external outputs. Subcircuits implemented in software or hardware exceed the useful functionality several times. Therefore, the effectiveness of using deductive analysis should be considered from the standpoint of increasing productivity, reducing equipment costs and integral time for designing a digital system and entering the electronic technology market. The purpose of the research is to reduce the time for modeling faults in logic circuits based on the synthesis of deductive functions. The object of the study is modeling faults in digital systems and components. The subject of the study is the deductive analysis of digital systems and components. **Results.** The study analyzed the main problems that accompany modern fault modeling. The trends of the latest modeling methods were considered. To build a defect modeling sequencer that is invariant to the input test sets, deductive formulas for transporting input fault lists to external outputs for X-functions from a finite number of variables are synthesized. The structure of a deductive simulator of logical X-functions is proposed. The advantages of a deductive simulator of logical X-functions were analyzed.

**Keywords:** modeling, simulation, fault, deductive modeling, Fault Simulation, vector logic, combinational logic circuit, verification, testing.

## ОСОБЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ АКАДЕМІЧНОГО ПЛАГІАТУ ЗОБРАЖЕНЬ

**Анотація.** Стрімке зростання обсягів візуального контенту в академічних документах актуалізує проблему виявлення академічного плагіату зображень. На відміну від текстового плагіату, який ефективно виявляється сучасними системами, візуальний плагіат залишається складним завданням через різноманіття форм його прояву та можливість маніпуляцій. **Метою** даної роботи є аналіз існуючих підходів до розпізнавання та порівняння зображень для виявлення академічного плагіату та виявлення особливостей. **Розглянуто** алгоритми комп’ютерного зору, моделі глибокого навчання, інших технологій для аналізу текстових елементів на зображеннях. **Запропоновано класифікацію** форм візуального плагіату, включаючи точне копіювання, афінні трансформації, семантичне дублювання та генерацію зображень. **Визначено основні проблеми:** відсутність глобальної бази зображень, складність вилучення нетекстового контенту, правові обмеження доступу до повних текстів. **Висновки:** аналіз зображень для виявлення академічного плагіату лишається актуальним та є перспективним напрямом досліджень, який може реалізовуватися за напрямками: удосконалення алгоритмів виявлення модифікацій та інтеграція візуального аналізу в системи перевірки текстового плагіату, створення репозиторіїв зображень, доступність інформаційних інструментів для експертів та науковців.

**Ключові слова:** академічна доброчесність, академічний плагіат зображень, візуальний контент, маніпуляції з зображеннями, академічні документи.

### Вступ

Академічна доброчесність є фундаментом освітньої та наукової діяльності. Це питання не втрачає актуальності через появу нових викликів. Найвпливовішим є легка доступність до використання користувачами систем на основі штучного інтелекту (ШІ). ШІ може бути застосований для генерації та обробки текстів, зображень, відеоматеріалів. Стрімко змінюється та розширюється ландшафт академічного плагіату. Хоча текстовий плагіат активно виявляється за допомогою спеціалізованих систем, візуальний академічний плагіат зображень (графіки, схеми, діаграми та інше) є окремим напрямом для дослідження [1–3]. Сучасні програми для виявлення плагіату (StrikePlagiarism.com, Turnitin, Grammarly, тощо) ефективно виявляють ознаки академічного плагіату у тексті, проте це не відноситься до роботи з зображеннями. Разом з цим, відбувається зростання кількості мультимедійного контенту в кваліфікаційних та наукових роботах.

Отже, виникає потреба у створенні підходів виявлення ознак академічного плагіату зображень. Це завдання має як наукову, так і практичну значущість, оскільки сприяє підвищенню рівня академічної доброчесності та допомагає науково-педагогічним працівникам та рецензентам при перевірці академічних робіт.

### Постановка проблеми

В наукових публікаціях описуються два підходи до виявлення ознак академічного плагіату:

- визначення абсолютної ідентичності [4];
- визначення ступеню подібності зображень [5–9].

На основі публікацій за темою обробки зображень визначимо вказані терміни.

Абсолютна ідентичність – повну відповідність двох зображень на рівні піксельної структури, геометричних параметрів, кольорової палітри та метаданих, що свідчить про їхню тотожність без жодних змін чи трансформацій. У контексті виявлення академічного плагіату абсолютна ідентичність означає, що одне зображення є прямою копією іншого, без редагування, обрізання, масштабування або застосування фільтрів. Автори [3] вважають, що абсолютна ідентичність має бути критерієм для виявлення академічного плагіату зображень.

Подібність **зображень** – це ступінь відповідності між двома зображеннями, що може бути визначений на основі їхніх візуальних, структурних або семантичних характеристик. Подібність може враховувати як точну відповідність пікселів, так і схожість форм, кольорів, текстур, просторових відношень або змісту, навіть у разі наявності трансформацій, таких як масштабування, обертання, обрізання чи зміна кольорової палітри. Низькорівневі методи порівняння базуються на піксельному порівнянні (MSE, Mean Squared Error – середньоквадратична похибка, SSIM, Structural Similarity Index Measure – структурна подібність). Високорівневі методи порівняння визначаються за допомогою ознак (SIFT, Scale-Invariant Feature Transform – масштабоінваріантне ознакове перетворення, SURF, Speeded-Up Robust Features – прискорені стійкі ознаки) або нейронних мереж. Подібність не означає ідентичність: два зображення можуть бути подібними за змістом, але відрізнятися за виглядом. Абсолютна ідентичність є одним з випадків подібності та означає 100% подібність.

### Основна частина роботи

Згідно з дослідженнями Meuschke N. [3], візуальний плагіат може проявлятися у багатьох різноманітних формах: точне копіювання, обрізання або

масштабування версій, обертання, дзеркальність, а також повторного використання графіків із незначними змінами. Детальніше класифікацію за Meuschke N. [3] описана в табл. 1.

Таблиця 1 – Класифікація візуального плагіату за Meuschke N. [3]

№	Форма	Форма англ.	Особливості
1.	Точне копіювання	Exact Copy	– Повна ідентичність зображення. – Без змін у розмірі, кольорі, структурі. – Виявляється за допомогою хешування або піксельного порівняння
2.	Обрізане копіювання	Cropped Copy	– Частина оригінального зображення використана без змін. – Часто застосовується для приховування джерела.
3.	Афінне перетворення	Affine Transformations	– Зображення змінено шляхом масштабування, обертання, зсуву. – Виявляється за допомогою методів ключових точок (SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), SURF (Speeded-Up Robust Features)).
4.	Зміна якості	Quality Modification	– Зображення розмиті, змінено контраст, освітлення. – Мета — ускладнити автоматичне виявлення.
5.	Семантичне копіювання	Semantics-Preserving Plagiarism	– Зображення перероблене, але передає ту саму ідею або дані. – Наприклад, графік з іншими кольорами, але з тими самими значеннями.
6.	Копіювання ідеї	Idea-Preserving Plagiarism	– Візуалізація створено нову, але вона базується на чужій ідеї або концепції

Для виявлення випадків повторного використання зображень у наукових роботах застосовуються різноманітні алгоритми комп'ютерного зору, які адаптовані до типів подібності, характерних для академічного контенту.

Алгоритм pHash (perceptual hashing) — це метод, який дозволяє порівнювати зображення не за точним збігом пікселів, а за візуальною схожістю, тобто тим, як зображення сприймається людським оком.

SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) та ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) виявляють стійкі ознаки на зображенні, які не змінюються при масштабуванні, обертанні чи зміні освітлення.

Моделі глибокого навчання здатні виявляти семантичну подібність, навіть якщо зображення було перероблене:

CNN (Convolutional Neural Networks) навчаються розпізнавати складні візуальні патерни;

Siamese Networks порівнюють пари зображень і визначають ступінь їх подібності на основі високорівневих ознак.

Існуючі алгоритми комп'ютерного зору можуть виконувати завдання подібності зображень з великою точністю. Особливого аналізу потребують діаграми, блок-схеми, графіки тощо. Вони можуть демонструвати значну ступінь подібності між собою та до вже опублікованого матеріалу, і не мати ознак академічного плагіату.

OCR (Optical Character Recognition) — це технологія, яка дозволяє розпізнавати текст на зображеннях та перетворювати його у машинозчитуваний формат. У контексті аналізу візуального контенту, автором Meuschke N. [3] описано, OCR використовується для:

- розпізнавання текстових міток на графіках, діаграмах, таблицях,
- зіставлення підписів, назв осей, легенд між різними зображеннями,
- виявлення повторного використання даних, навіть якщо візуальне оформлення змінено.

Завдання зі з'ясування, чи зображення раніше зустрічалося у статті, не є просто проблемою

подібності зображень, оскільки рисунки та діаграми утворюють лише частину сторінки рукопису. Також криві (залежності) для різних змінних можуть мати високу ступінь подібності. Ця складність академічних діаграм ще більше ускладнює проблему виявлення плагіату зображень. Автори [4] вважають це однією з причин того, що для прийняття рішення про академічний плагіат зображень, необхідно встановити його абсолютну ідентичність з існуючим зображенням.

Науковці створюють авторські підходи до вирішення проблеми визначення академічного плагіату візуального контенту.

Алгоритм «VIBRANT-WALK» [4] складається з 2 етапів: попередня обробка зображень виконується шляхом створення «Матриці яскравості» діаграми/малюнка; здійснюється попіксельне порівняння зображення із зображеннями сторінок раніше опублікованих рукописів. Для оптимізації процесу порівняння, процес розпочинається з пікселя на зображенні, який має найвище значення у Матриці яскравості. Для реалізації алгоритму необхідно мати набір даних із зображеннями рисунків і діаграм, які будуть використані для порівняння.

Загальний алгоритм [5] складається з трьох етапів: попередньої обробки, вилучення ознак та порівняння. Точність становить 100% у випадку невідредагованих зображень та змінюється в інших операціях, таких як перевертання, поворот, відтінки сірого та обрізання.

Виявлення плагіату зображень є складною галуззю досліджень, оскільки можуть аналізуватися не лише текстова аналітика, а й графічні особливості. У статті [6] досліджується питання плагіату зображень через аналіз пошуку подібних семантичних значень між зображеннями шляхом застосування методів обробки зображень та семантичного картування.

Запропоновані у [7, 8] методи використовують розширене вилучення текстових ознак та методи обчислення подібності: подібність на основі текстових посилань на рисунки. На основі аналізу текстових посилань на зображення, метод дозволив класифіку-

вати даний рисунок як «академічний плагіат» або «ні» залежно від певного порогового значення. Результати [7] показали, що запропонована методика досягла результату точності = 0,78 та повноти = 0,67 з точки зору міри оцінки.

Сформулюємо основні проблеми у визначенні академічного плагіату зображень. На основі публікацій можемо виокремити особливості застосування підходів виявлення ознак академічного плагіату зображень, які впливають на ефективність застосування та на точність результатів:

- широкі можливості маніпуляцій з зображеннями;
- відсутність глобальної бази для порівняння зображень з академічних документів;
- подібні форми представлення візуального контенту в академічних документах (графіки, схеми, діаграми, тощо).

В табл. 2 представлено широкий перелік типів маніпуляцій з зображеннями. Кожен тип маніпуляції має власні ознаки, які слід враховувати при створенні технічних рішень для його виявлення.

Таблиця 2 – Типи маніпуляцій із зображеннями в академічному контексті

№	Тип маніпуляції	Опис	Джерело
1.	Точне дублювання	Повторне використання зображення без змін	[9]
2.	Дублювання з переміщенням	Копія фрагмента вставлена в інше місце	[10]
3.	Дублювання з модифікацією	Копія змінена (розмиття, контраст, обертання)	[9]
4.	Копіювання та вставка	Об'єкти дублюються в межах одного зображення	[11]
5.	Видалення об'єктів	Видалення частин зображення з відновленням фону	[11]
6.	Композиція зображень	Об'єднання елементів з різних джерел	[11]
7.	Ретушування	Зміна кольору, яскравості, контрасту	[10]
8.	AI-генерація / Deepfakes	Створення зображень за допомогою генеративних моделей	[11]

Ключовим елементом успішного виявлення візуального академічного плагіату є наявність бази зображень, яка містить оригінальні графіки, діаграми, фотографії та інші візуальні матеріали з академічних документів. Ця база дозволяє здійснювати порівняння нових зображень із вже наявними, виявляючи повторне використання або модифікації. Вона також є має бути основою для навчання моделей глибокого навчання, що потребують великої кількості прикладів для досягнення високої точності.

Процес вилучення зображень для формування бази є окремим складним завданням. З моменту появи академічних видань було опубліковано мільйони статей та різних академічних текстів, отже, неможливо витягти окремі зображення з усіх цих документів. Дослідження з вилучення зображень з документів постійно розвиваються. Одним із таких прикладів є дослідження [12], яке мало 83% точності вилучення зображень.

Розділення «тексту» та «не тексту» є важливим кроком обробки для будь-якої системи аналізу документів. Тому важливо мати чітке розуміння сучасного стану розділення «тексту» та «не тексту», щоб сприяти розробці ефективних систем обробки документів. У статті [13] підсумовано технічні проблеми розділення тексту, питання класифікації зображень, висвітлено майбутні проблеми та напрямки досліджень у цій галузі.

Окремим напрямом для впровадження є створення репозиторію всіх сторінок статей, які були опубліковані. Однаково критично на це завдання впливають правовий та технологічний аспекти. Авторське право регулює доступ до повних текстів документів та «закриває» доступ до значної частини контенту. Навіть за наявності 5001 репозитаріїв в світі (за даними Registry of Open Access Repositories), це завдання ще далеке до вирішення: Африка (201); Азія (1118); Європа (1798); Північна Америка (1071);

Океанія (102); Південна Америка (711). В Україні відповідно до вказаного реєстру зареєстровано 138 інституційних репозитаріїв.

В електронному репозитарії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (eNTUKhPIIR, ISSN 2409-5982) міститься близько 80 тис. повних текстів академічних документів.

Без наявності бази зображень для порівняння підходи до визначення академічного плагіату зображень не зможуть досягти своїх цілей.

### Висновки і перспективи подальших розвідок

Аналіз зображень для виявлення академічного плагіату, особливо в умовах доступності ШІ, лишається актуальним та є перспективним напрямом, що потребує подальших досліджень. Сучасні методи комп'ютерного зору демонструють високу точність, особливо при використанні глибоких нейронних мереж. Впровадження таких систем у освітні та наукові установи сприятиме підвищенню рівня академічної доброчесності. Подальші дослідження мають бути спрямовані на:

- створення підходів до визначення подібності візуального контенту;
- розвиток алгоритмів вилучення нетекстового контенту з академічних документів;
- формування глобальної бази зображень для проведення порівнянь; удосконалення алгоритмів виявлення модифікованих зображень для всіх типів маніпуляцій;
- інтеграцію процесів виявлення академічного плагіату візуального контенту в системи виявлення текстових запозичень (подібностей у тексті);
- включення спеціальних інструментів до наукових платформи та у редакційні процеси для допомоги експертам та науковцям.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Eisa T. A. E. Plagiarism detection of figure images in scientific publications. *International Journal of Data Mining, Modelling and Management*. 2022. Vol. 14, no. 1. P. 15. DOI: <https://doi.org/10.1504/ijdm.2022.10046101>
2. Saliba, T., Rotzinger, D. Figure plagiarism and manipulation, an under-recognised problem in academia. *Eur Radiol*. 2025. Vol. 35, 4518–4521. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00330-025-11426-2>
3. Meuschke N. *Analyzing Non-Textual Content Elements to Detect Academic Plagiarism*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2023.
4. Parmar S., Jain B. VIBRANT-WALK: An algorithm to detect plagiarism of figures in academic papers. *Expert Systems with Applications*. 2024. P. 124251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124251>
5. Ibrahim A. S. B., Khalifa O. O., Ahmed D. E. M. Plagiarism Detection of Images. 2020 IEEE Student Conference on Research and Development (SCoReD), Batu Pahat, Johor, Malaysia, 27–29 September 2020. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/scored50371.2020.9250940>
6. Eisa T. A. E., Salim N., Abdelmaboud A. Content-Based Scientific Figure Plagiarism Detection Using Semantic Mapping. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham, 2019. P. 420–427. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-33582-3\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33582-3_40)
7. Eisa T. A. E., Salim N., Alzahrani S. Figure plagiarism detection based on textual features representation. 2017 6th ICT International Student Project Conference (ICT-ISPC), Johor, Malaysia, 23–24 May 2017. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/ict-ispc.2017.8075305>
8. Eisa T., Salim N., Alzahrani S. Figure Plagiarism Detection Using Content-Based Features. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Singapore, 2017. P. 17–20. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-3779-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3779-5_3)
9. Mazaheri, G., Avila, K. U., & Roy-Chowdhury, A. K. Learning to identify image manipulations in scientific publications. 2021. arXiv preprint arXiv:2102.01874.
10. Mijatović, A., Žuljević, M. F., Ursić, L., Bralić, N., Vuković, M., Roguljić, M., & Marušić, A. How good are medical students and researchers in detecting duplications in digital images from research articles: a cross-sectional survey. *Research Integrity and Peer Review*. 2025. Vol. 10(1), 14.
11. Duszejko, P., Walczyna, T., & Piotrowski, Z. (2025). Detection of Manipulations in Digital Images: A Review of Passive and Active Methods Utilizing Deep Learning. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15(2), 881. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15020881>.
12. JOSHI, Parag Mulendra; LIU, Sam. Web document text and images extraction using DOM analysis and natural language processing. In: *Proceedings of the 9th ACM symposium on Document engineering*. 2009. p. 218–221.
13. Bhowmik, S., Sarkar, R., Nasipuri, M., & Doermann, D. Text and non-text separation in offline document images: a survey. *International Journal on Document Analysis and Recognition (IJ DAR)*. 2018. 21(1-2), 1–20.

Received (Надійшла) 11.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.08.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Главчева Юлія Миколаївна** – PhD, комп'ютерні науки, директор науково-технічної бібліотеки, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

**Yuliia Hlavcheva** – PhD, Computer Science, Director of the Scientific and Technical Library, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [Yuliia.Hlavcheva@kpi.edu.ua](mailto:Yuliia.Hlavcheva@kpi.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-7991-541> ;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57845103200>.

**Главчев Максим Ігорович** – кандидат економічних наук, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

**Maksym Glavchev** – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Professor of Department Computer Engineering and Programming, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [Maksym.Glavchev@kpi.edu.ua](mailto:Maksym.Glavchev@kpi.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-9670-9118>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57222569081>.

**Features of detecting academic image plagiarism**

Yuliia Hlavcheva, Maksym Glavchev

**Abstract.** The rapid growth of visual content in academic documents highlights the issue of detecting academic image plagiarism. Unlike textual plagiarism, which is effectively identified by modern systems, visual plagiarism remains a challenging task due to the diversity of its manifestations and the potential for manipulation. **The aim of this work** is to analyze existing approaches to image recognition and comparison for detecting academic plagiarism and to identify key features. The study examines computer vision algorithms, deep learning models, and other technologies for analyzing textual elements within images. A classification of visual plagiarism forms is proposed, including exact copying, affine transformations, semantic duplication, and image generation. **The main features are identified:** extensive possibilities for manipulation and specific forms of visual content representation, lack of a global image database, difficulty in extracting non-textual content, and legal restrictions on access to full texts. **Conclusions:** Image analysis for detecting academic plagiarism remains a relevant and promising research direction, which can be implemented through the following avenues: improving modification detection algorithms and integrating visual analysis into textual plagiarism detection systems, creating image repositories, and ensuring the availability of informational tools for experts and researchers.

**Keywords:** academic integrity, academic image plagiarism, visual content, image manipulation, academic documents.

Valeriy Gorbachov, Vitalii Fedorov

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

## ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF RANDOM GRAPHS

**Abstract. Relevance.** In the modern world, the majority of social, biological, technological, and communication processes occur in the form of complex network structures. The analysis of such systems requires the construction of mathematical models capable of adequately describing their topology, stochastic nature, and dynamic properties. One of the most powerful tools for this is the theory of random graphs, which enables the modeling of a wide range of real-world phenomena – from the spread of viruses and information to the functioning of critical infrastructures. Classical models, particularly the Erdős-Rényi model, laid the foundation of modern graph theory; however, they have limitations in describing networks with high clustering or uneven degree distributions. Therefore, in recent years, modern approaches have gained special significance, including small-world models, which reflect the properties of real social and biological systems with short paths and a high level of clustering, and scale-free graphs, which model networks with heterogeneous degree distributions. The relevance of this topic is due to the need to select and analyze an appropriate mathematical model that can accurately represent the properties of real networks, enable justified prediction of their behavior, identify vulnerabilities, and optimize the functioning of complex systems. In this context, the analysis of mathematical models of random graphs is an important area of modern applied mathematics, computer science, and systems theory. **The object of research:** Random graphs as mathematical structures that model the topology and dynamics of complex networked systems. **Purpose of the article:** Research, systematization, and comparative analysis of mathematical models of random graphs to determine their suitability for modeling various types of complex networked systems. **Research results.** The article presents an analysis of mathematical models of random graphs that underpin modern network science. Beginning with the theoretical foundations of graphs, both classical and contemporary models for constructing random networks are examined, alongside methods of their analysis and practical areas of application. The methods of analysis are critically important for the practical use of random graphs, as they enable the models to be applied to forecasting, diagnostics, and the management of complex systems. These methods also provide a foundation for integrating mathematical models with real-world data, which is a key objective of contemporary network science. Classical models allow for the formalization of randomness in network connections; however, they have significant limitations in capturing the real topological properties of complex networks – particularly high clustering, degree heterogeneity, and growth mechanisms. In contrast, modern models correspond much more closely to the structure of real-world systems. They make it possible to model such essential features as the emergence of hubs, clustering, short average path lengths, and robustness to failures. **Conclusions.** Mathematical models of random graphs are a universal tool for the analysis and synthesis of various networked systems. Their application allows not only for the formal description of a complex system's structure, but also for the discovery of its hidden patterns, the prediction of its behavior under different conditions, and the optimization of its functioning while accounting for real-world constraints.

**Keywords:** random graphs, mathematical modeling, scale-free networks, Erdős-Rényi model, clustering, spectral analysis, network structures.

### Introduction

In recent decades, interest in the study of complex networks has grown rapidly, driven by their wide-ranging applications across various fields of science and technology. Social networks, the Internet, biological and ecological systems, as well as transportation and energy infrastructures all share a common feature: they can be described in the form of graphs, where vertices represent system elements and edges represent interactions between them. However, in real-world conditions, such structures are rarely regular or deterministic – they are, as a rule, random. For this reason, mathematical models of random graphs have become a vital tool for the analysis and description of such systems.

Beginning with the classical works of Erdős and Rényi, in which the concept of a random graph was first introduced, the theory has progressed toward more sophisticated models that more accurately describe the properties of real networks. Small-world models have proven effective for representing social and biological networks, where high clustering coexists with short average path lengths. Another important direction involves scale-free models, which reproduce the power-law degree distribution observed in many systems.

Contemporary research focuses on comparing different models, identifying their structural characteristics, adapting them to specific applied problems, and analyzing their computational properties. In this context, a systematic review of existing approaches to modeling random graphs is of relevance – including an assessment of their strengths and limitations, and the formulation of recommendations for model selection depending on the type of network.

**Analysis of publications.** The analysis of mathematical models of random graphs is a key area of modern network theory, with wide applications in computer science, biology, sociology, and other fields. Among the main models that describe the structure and dynamics of real networks are the classical Erdős-Rényi model, “small-world” models, and scale-free models [1].

The Erdős-Rényi model is one of the first and simplest models of random graphs, in which each pair of vertices relates to a certain probability. This model allows for the study of fundamental graph properties such as the connectivity threshold and the degree distribution of vertices. The “small world” model, proposed by Watts and Strogatz, is characterized by a high clustering coefficient and a small average path length between vertices. This model reflects the properties of many re-

al-world networks, such as social or biological networks, where there is a tendency to form clusters while simultaneously maintaining short paths between any two vertices.

Scale-free models, particularly the Barabási–Albert model, describe networks in which the degree distribution follows a power-law. This means that the network contains a small number of nodes with very high degree, while many nodes have a low degree. Such networks exhibit high resilience to random failures but are vulnerable to targeted attacks on hubs.

Recent studies also explore models that combine properties of small-world and scale-free networks, as well as models that incorporate the geometric and topological features of real systems. These approaches allow for more accurate modeling and analysis of complex network structures found in nature and technology.

In article [2], the emergence of clustering in random graphs with scale-free structure is examined, particularly in the context of hyperbolic models. The authors propose a method for analyzing the probability of triangle formation in graphs that takes vertex degrees into account. The study also considers a model in which vertices are embedded in hyperbolic space, enabling the reproduction of real-world network properties such as clustering and scale-freeness. It is shown that, unlike in some other models, clustering in hyperbolic graphs does not vanish as the network grows. This research represents an important step toward understanding the structure and properties of complex networks, especially in the context of modeling real systems such as social networks or the internet.

**The purpose of this work** is to analyze the main mathematical models of random graphs, to classify and characterize them, and to evaluate their suitability for use in various contexts, including the modeling of social, technological, and biological networks.

### Main part

Mathematical graph theory serves as a foundation for modeling complex systems in which objects interact as nodes connected by links. In random graphs, these links are established not deterministically but with a certain probability, allowing for the modeling of real-world phenomena characterized by uncertainty, variability, and dynamic behavior. Random graphs (Fig. 1) are defined by several important parameters that determine their structure: vertex degree, connected components, graph diameter, average path length, and clustering coefficient. These characteristics make it possible to evaluate both local and global properties of the network.

Classical models of random graphs have formed the theoretical foundation upon which modern network science is built. They allow for the formal description and analysis of the network formation process, the identification of critical thresholds for structural transitions, and the estimation of the probability of the emergence of connected components. Although these models are simplified and often fail to capture the complex nature of real-world networks, they remain an essential step in understanding the basic mechanisms behind link formation between elements.

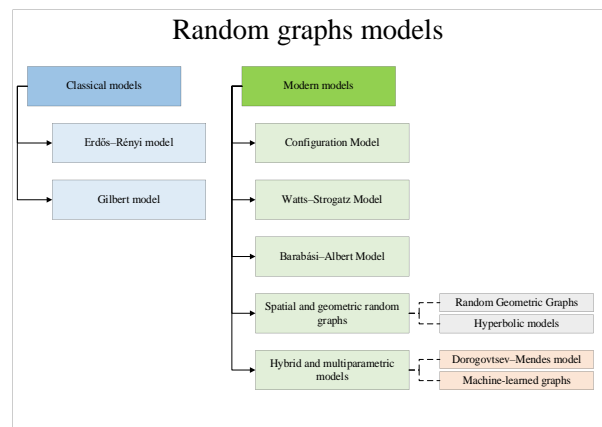


Fig. 1. Random graphs models

The Erdős-Rényi model was the first formalized model of a random graph. This approach assumes that each possible edge is independently included with equal probability  $pp$ , generating a set of possible graphs with varying numbers of edges. There is also a version  $G(n, m)$ , in which exactly  $m$  random edges are formed. Graphs produced by this model exhibit a low clustering coefficient and a narrow degree distribution close to binomial. This model is well suited for scenarios where all connections are independent and equally probable, but it does not capture the high clustering or heterogeneity typical of real networks.

The Gilbert model [3], proposed around the same time as the Erdős-Rényi model, is formally very similar: it also defines the probability of edge formation between vertex pairs, but does so in a more general probabilistic framework, without fixing the number of vertices or edges. The Gilbert model is sometimes used as a basis for constructing probabilistic graphs with uneven weight distributions or vertex dependencies, although in practice, the Erdős-Rényi formalism is more commonly employed.

Classical models make it possible to theoretically compute the likelihood of certain structural properties. However, classical graphs exhibit almost no local clustering, which limits their applicability to the modeling of social or biological networks.

Despite their importance, classical models have significant limitations: the degree distribution is symmetric and narrow, which does not correspond to the power-law distributions observed in real networks; they lack mechanisms for growth and preferential attachment; and they feature low clustering levels. These shortcomings have driven the development of modern random graph models that can reflect the heterogeneous nature of connections, clustering, the emergence of hubs, and other non-trivial properties.

With the development of network research, it became evident that classical models of random graphs – particularly the Erdős-Rényi model – are unable to capture many important characteristics of real systems, such as high clustering, heterogeneous degree distributions, or the presence of hubs. To overcome these limitations, modern models have been developed that account for more complex mechanisms of link formation in networks.

The configuration model [4] allows the generation of random graphs with a predefined degree distribution. The main idea is to assign each vertex a certain number of “half-edges” in advance and then randomly pair them to form complete edges.

Key features of this model include flexibility (it can model arbitrary degree distributions, including power-law), low clustering, and frequent use as a null model for real-world networks with specified degree characteristics.

There are also spatial and geometric random graph models. In such models, vertices are embedded in Euclidean or hyperbolic space, and connections between them are determined by distance. For instance, in hyperbolic graphs, distance is defined using non-Euclidean geometry, enabling accurate replication of real network properties. Examples include graphs in which vertices are randomly distributed on a plane and links are formed if the distance between them is below a certain threshold. Hyperbolic models support the modeling of networks that simultaneously exhibit high clustering, power-law degree distributions, and short average path lengths. These models are used in the modeling of internet networks, infrastructure, transport systems, and for optimizing the physical placement of nodes in distributed systems.

Recent studies have introduced hybrid models that combine characteristics of “small-world,” scale-free, and spatial graphs. These approaches enable more precise modeling of the specific features of real-world networks. Among them are the Dorogovtsev-Mendes model [5], based on network growth with cyclic attachments, as well as machine learning-based models [6], which employ algorithms to simulate the evolution of network technology.

Modern random graph models demonstrate greater flexibility and alignment with real structures compared to classical ones. They consider not only the probability of connections, but also the mechanisms of their formation, spatial constraints, network growth history, and link heterogeneity.

Analytical methods for studying the properties of random graphs make it possible to determine critical graph parameters, investigate structural dynamics, identify key nodes, assess clustering, and predict network resilience to failures. These methods include probabilistic analysis, spectral analysis, algorithmic and numerical methods, as well as visualization and interpretation techniques.

The probabilistic approach is fundamental in the study of random graphs, as the main models are based on probability. This type of analysis includes: calculating the expected number of connected components, triangles, and degree distributions; estimating the probabilities of the emergence of specific graph properties, such as connectivity, the existence of a giant component, or cycles of a given length; and analyzing phase transitions, where a small change in the parameter  $p$  in the  $G(n, p)$  model leads to a sudden structural shift in the graph. This approach utilizes the law of large numbers, Chebyshev's theorems, probabilistic limits, and asymptotic estimates, especially for large  $n$ .

Spectral graph theory investigates the properties of the adjacency matrix or the graph Laplacian, which enables the assessment of graph connectivity; the identification of central nodes and groups of nodes with similar spectral properties; and the detection of cluster structures via spectral partitioning. These methods are effective in revealing hidden structures, especially in large and complex networks. Spectral analysis is often used for visualization, clustering, and evaluating the dynamics of spreading processes.

In many cases, analytical investigation of a graph becomes impractical due to its complexity or dimensionality, prompting the use of numerical approaches: simulation modeling (generating a large number of graphs under a given model for statistical analysis); Monte Carlo methods, used to estimate the probabilities of complex events, such as resilience to random or targeted node removals; graph algorithms, applied to identify connected components, calculate centralities, construct minimum spanning trees, etc.; and clustering analysis. Graph visualization tools enable intuitive understanding of network structure, identification of hubs, isolated components, communities, and the analysis of structural changes over time.

Mathematical models of random graphs are widely used in numerous fields where systems can be represented as a set of interconnected objects. With the growth of information technology, bioinformatics, sociology, and cybersecurity, the importance of such models continues to rise. A properly selected model allows for an accurate reproduction of real network structures, analysis of their properties, detection of vulnerabilities, and prediction of system behavior under various scenarios. In sociology, random graphs are used to model interpersonal interactions, contacts, and information exchange. Social networks exhibit “small-world” properties – high clustering and short paths between any two individuals. These models can be applied to study the influence of key individuals, the spread of opinions, rumors, and information, the identification of communities or social groups, and the prediction of behavior in dynamic networks. Models such as those of Watts-Strogatz and Barabási-Albert allow for the reproduction of such network properties, including the presence of hubs (opinion leaders) and cluster structures.

The internet, telephone networks, and peer-to-peer systems are classical examples of communication networks, where nodes represent devices and edges represent communication channels. It has been observed that the internet exhibits a scale-free structure, meaning a small number of nodes have an exceptionally high number of connections. Random graph models can be applied to analyze network resilience to failures, optimize traffic routing, identify vulnerable regions in the topology, and design fault-tolerant architectures.

Biological systems – such as brain neural networks, metabolic pathways, and protein or gene interactions – also exhibit complex network structures. These networks often feature small average path lengths, high clustering, and power-law degree distributions. Graph models can be used to identify critical genes or proteins, analyze signal transmission in neural circuits, simulate

failures or mutations, and study functional modules within cells. They enable the investigation of not only topology but also functional interactions among biomolecules within a systems biology context.

One of the most prominent application areas of random graph models is the simulation of diffusion processes, such as the spread of diseases, rumors, or fake information, viral content propagation, and malware dissemination. SIR, SIS, and SEIR models [7] are commonly combined with graph topology to simulate epidemic outbreaks. Understanding topological properties – such as average path length or clustering coefficient – helps predict the scale of spreading and assess the effectiveness of countermeasures.

Power grids, water supply systems, transportation networks, and other critical infrastructures can be modeled as random or deterministic graphs. Key challenges

include assessing resilience, optimizing design, and ensuring efficient maintenance. These models are used to identify critical nodes, simulate failure scenarios, optimize resource placement, and design backup communication routes. In complex systems operating in real time, hybrid and spatial graph models are especially valuable, as they account for geographic location, bandwidth constraints, and dynamic load variations. Dorogovtsev-Mendes models introduce recursive growth with feedback, useful for hierarchical systems.

In the process of modeling complex networks, the choice of an appropriate mathematical model is of critical importance. Each model has its own advantages, limitations, structural properties, and domain of effective application. Table 1 presents the results of a comparative analysis of key random graph models based on essential criteria.

Table 1 – Comparative Analysis of Models

Model	Degree Distribution	Clustering	Average Path Length
Erdős-Rényi	Binomial	Low	Short
“small-world”	Approximately regular	High	Short
Barabási-Albert	Power-law	Low-medium	Short
Configuration model	User-defined	Low	Depends on input
Hyperbolic random graphs	Power-law	High	Very short
Dorogovtsev-Mendes	Power-law	Medium-high	Short

The analysis has shown that there is no universal model suitable for all types of networks. The selection of a model should be based on the core characteristics of the system under study – such as the nature of the degree distribution, the presence of a clustered structure, the dynamic nature of connections, and spatial or resource constraints. In complex applied problems, the best results are often achieved by hybrid or adaptive models that combine elements of several approaches.

### Conclusions

An analysis of mathematical models of random graphs – foundational to modern network science – has been conducted. Starting from the theoretical foundations of graph theory, both classical and contemporary models for constructing random networks have been examined, along with analytical methods and practical applications. Analytical techniques are critically important for the practical use of random graphs, as they make models suitable for prediction, diagnostics, and the management of complex systems. These methods also provide the basis for integrating mathematical models with real-world data, which is a central goal of contemporary network science.

Classical models make it possible to formalize the randomness of connections in a network, but they have significant limitations when it comes to reproducing the real topological features of complex networks – particularly high clustering, degree heterogeneity, and growth mechanisms. Modern models correspond much more closely to the structure of real systems. They allow for the modeling of important features such as the emergence of hubs, clustering, short average path lengths, and robustness to failures.

The Erdős-Rényi model, despite its simplicity and mathematical convenience, has low clustering and does not reflect the uneven structure of connections. Therefore, it is better suited for theoretical studies and as a baseline reference. The Watts-Strogatz model effectively simulates networks with a high level of local cohesion and short average path lengths, which are typical of social and certain biological systems. However, its degree distribution is too uniform to reflect many real-world structures.

The Barabási-Albert scale-free model reproduces the empirical power-law distribution of connections and the emergence of hubs, making it optimal for modeling internet networks, bioinformatics systems, and information node interactions. However, its lack of sufficient clustering limits its application in social contexts unless modified. The configuration model offers high flexibility by allowing arbitrary degree distributions but does not model network growth and requires external information about topology. Spatial and hyperbolic graphs are best suited for modeling infrastructure and transportation networks, where physical node placement and distance constraints play a critical role.

Mathematical models of random graphs serve not only as tools for the formal description of network structures but also as the basis for decision-making, system dynamics prediction, vulnerability detection, and optimization in complex environments.

Ultimately, mathematical models of random graphs are a universal tool for the analysis and synthesis of diverse networked systems. Their application allows not only for the formal description of a complex system’s structure, but also for the discovery of hidden patterns, prediction of behavior under different conditions, and optimization of functionality under real-world constraints.

## REFERENCES

1. Freeze A., Karonski M. Introduction to random graphs. Carnegie Mellon University, 2025. 668 p.
2. Clara Stegehuis, Remco van der Hofstad, Johan S.H. van Leeuwen. Scale-free network clustering in hyperbolic and other random. Department of Mathematics and Computer Science. Eindhoven University of Technology, 2018. P.1-19. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.03002>
3. Freeze A., Karonski M. Random Graphs and Networks: A First Course. Cambridge University Press, 2023. 232 p. <https://doi.org/10.1017/9781009260268>
4. Bailey K. Fosdick, Daniel B. Larremore, Joel Nishimura, Johan Ugander. Configuring Random Graph Models with Fixed Degree Sequences. Vol. 60, iss., 2018. P. 315-355. <https://doi.org/10.1137/16M1087175>
5. S.N. Dorogovtsev, J.F.F. Mendes. Evolution of Networks: From Biological Nets to the Internet and WWW, 1st ed, Oxford University Press, 2013. 280 p. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198515906.001.0001>
6. Wei Ju, Zheng Fang, Yiyang Gu, Zequn Liu, Qingqing Long, Ziyue Qiao, Yifang Qin, Jianhao Shen, Fang Sun, Zhiping Xiao, Junwei Yang, Jingyang Yuan, Yusheng Zhao, Yifan Wang, Xiao Luo, Ming Zhang. A Comprehensive Survey on Deep Graph Representation Learning. Cornell University, 2023. 100 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.05055>
7. Michael Y. Li. An Introduction to Mathematical Modeling of Infectious Diseases. 1st ed, Springer, 2018. 168 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72122-4>

Received (Надійшла) 02.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.08.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Горбачов Валерій Олександрович** – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Valeriy Gorbachov** – Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [valeriy.gorbachov@nure.ua](mailto:valeriy.gorbachov@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0003-3423-2371>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56535422600>.

**Федоров Віталій Миколайович** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Vitalii Fedorov** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [vitalii.fedorov@nure.ua](mailto:vitalii.fedorov@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0009-1881-7661>.

## Аналіз математичних моделей випадкових графів

В. О. Горбачов, В. М. Федоров

**Анотація. Актуальність.** У сучасному світі більшість соціальних, біологічних, технологічних і комунікаційних процесів відбувається у вигляді складних мережевих структур. Аналіз таких систем вимагає побудови математичних моделей, здатних адекватно описувати їхню топологію, випадкову природу та динамічні властивості. Одним із найпотужніших інструментів для цього є теорія випадкових графів, що дозволяє моделювати широке коло реальних явищ – від поширення вірусів і інформації до функціонування критичних інфраструктур. Класичні моделі, зокрема модель Ердеша-Реньї, заклали фундамент сучасної теорії графів, однак вони мають обмеження в описі мереж з високою кластеризацією чи нерівномірним розподілом зв'язків. Тому останнім часом особливого значення набули сучасні підходи, серед яких моделі типу «світ тісний», що відображають властивості реальних соціальних чи біологічних систем із короткими шляхами та високим рівнем кластеризації) та безмасштабні графи, що моделюють мережі з нерівномірним розподілом ступенів. Актуальність теми зумовлена необхідністю вибору та аналізу відповідної математичної моделі, яка забезпечить точне представлення властивостей реальних мереж, дозволить проводити обґрунтоване прогнозування їх поведінки, виявляти вразливості та оптимізувати функціонування складних систем. У цьому контексті аналіз математичних моделей випадкових графів є важливим напрямом сучасної прикладної математики, інформатики та теорії систем. **Об'єкт дослідження:** випадкові графи як математичні структури, що моделюють топологію та динаміку складних мережевих систем. **Мета статті:** дослідження, систематизація та порівняльний аналіз математичних моделей випадкових графів для визначення їх придатності до моделювання різних типів складних мережевих систем. **Результати дослідження.** У статті проведено аналіз математичних моделей випадкових графів, що лежать в основі сучасної мережної науки. Починаючи з теоретичних основ графів, було досліджено як класичні, так і сучасні моделі побудови випадкових мереж, методи їх аналізу та практичні напрями застосування. Методи аналізу є критично важливими для практичного використання випадкових графів, оскільки саме вони дозволяють зробити моделі придатними для прогнозування, діагностики та управління складними системами. Вони також формують основу для інтеграції математичних моделей з реальними даними, що є ключовою метою сучасної науки про мережі. Класичні моделі дозволяють формалізувати випадковість зв'язків у мережі, проте мають суттєві обмеження у відтворенні реальних топологічних властивостей складних мереж, зокрема високої кластеризації, неоднорідності ступенів та механізмів зростання. Сучасні моделі значно краще відповідають структурі реальних систем. Вони дозволяють моделювати такі важливі характеристики, як поява хабів, кластеризація, коротка середня довжина шляху та стійкість до збоїв. **Висновки.** Математичні моделі випадкових графів є універсальним інструментом для аналізу та синтезу різноманітних мережевих систем. Їх застосування дозволяє не лише формально описати структуру складної системи, а й виявити її приховані закономірності, передбачити її поведінку за різних умов, а також оптимізувати функціонування з урахуванням реальних обмежень.

**Ключові слова:** випадкові графи, математичне моделювання, безмасштабні мережі, модель Ердеша–Реньї, кластеризація, спектральний аналіз, мережеві структури.

О. А. Горносталь, В. В. Челак

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

## КЛАСИФІКАЦІЯ МЕРЕЖЕВИХ АТАК МЕТОДАМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ В УМОВАХ ДИСБАЛАНСУ ТРЕНУВАЛЬНИХ ДАНИХ

**Анотація.** Об'єктом дослідження є процес виявлення мережових вторгнень. Предметом дослідження є методи класифікації мережових вторгнень. Метою дослідження є підвищення якості та швидкості ансамблевих класифікаторів в задачах класифікації мережових вторгнень в умовах дисбалансу тренувальних даних. **Методи, що використовуються:** методи машинного навчання, методи попередньої обробки даних, ансамблеві класифікатори, метод перебалансування шляхом синтетичного збільшення меншості (SMOTE). **Отримані результати:** досліджено ефективність використання різних підходів для класифікації мережових вторгнень в умовах дисбалансу класів у тренувальній вибірці. Запропоновано комплексний підхід, що передбачає попередню обробку даних за допомогою методу SMOTE для синтетичного балансування навчальної вибірки, а також його подальший аналіз з використанням ансамблевих моделей машинного навчання, що дало змогу покращити показники класифікації міноритарних класів. Найкращі результати отримано при поєднанні SMOTE з ансамблевими моделями, зокрема Bagging, Gradient Boosting та AdaBoost. **Висновки.** За результатами дослідження запропоновано удосконалений підхід до класифікації мережового трафіку, який поєднує попереднє балансування вибірки методом SMOTE з ансамблевими алгоритмами беггінг та бустинг. Комплексне використання цих методів дозволило покращити значення метрики Recall для міноритарних класів. Загалом запропонований підхід забезпечив покращення якості класифікації: 18% для атак типу Infiltration, 33% для атак з використанням SQL-ін'єкцій та до 53% для атак XSS у порівнянні з базовими моделями машинного навчання без додаткового перебалансування вхідних даних.

**Ключові слова:** мережеві атаки, класифікація, машинне навчання, ансамблі, беггінг, бустинг, показники якості, SMOTE.

### Вступ

Інформаційні системи давно стали невід'ємним атрибутом майже усіх сфер людського життя: від вирішення інженерних задач до обробки банківських транзакцій та зберігання медичних відомостей. При цьому будь-які потенційні або реальні загрози їх цілісності можуть спричинити значні підвищення витрат на їх обслуговування. Незважаючи на це, питання безпеки інформаційних систем залишається досить актуальним з урахуванням великої кількості кібератак за останні роки. Це підтверджується статистичними даними [1] та пояснюється тим фактом, що більшість з них працює в мережі та постійно обмінюється великими об'ємами інформації, що дозволяє зловмисникам легше отримувати до них доступ та швидше виконувати протиправні дії по відношенню до інфраструктури та даних. Крім цього, при роботі з комп'ютерними мережами необхідно враховувати апаратні збої, перевантаження та ризики, незалежні від зовнішніх чинників.

Задача також ускладнюється наявністю великої кількості складників та параметрів, якими характеризується функціонування комп'ютерної мережі. Через це традиційні аналітичні методи або не дозволяють отримати бажаної точності виявлення вторгнень, або не можуть впоратися з їх якісним розрізненням, або працюють надто довго, що робить неможливим їх використання у динамічних системах, де необхідно приймати рішення в режимі реального часу. Завдяки цьому постає нагальна потреба в удосконаленні існуючих підходів та у створенні нових, які б могли задовольнити сучасним потребам.

**Об'єктом дослідження** є процес виявлення мережових вторгнень. **Предметом дослідження** є методи класифікації мережових вторгнень.

**Огляд пов'язаних наукових публікацій.** Виявлення мережових вторгнень представляє собою комплексний процес збору та обробки інформації про поточні події в мережі. Одним з класичних підходів є сигнатурна група методів [2-3], які полягають у дослідженні відомих закономірностей та в пошуку схожих елементів з відомими загрозами. До них відносять [4] алгоритми порівняння шаблонів, хешей та використання Yara-правил [5]. Основним недоліком цієї групи методів є фактична неможливість виявлення раніше невідомих загроз, адже спостереження та аналіз ведуться з урахуванням вже досліджених вторгнень на основі виявлення точних або часткових співпадінь. Навіть якщо шаблони певної атаки існують, але зловмисники внесли деякі зміни в алгоритм своїх дій, то їх буде дуже складно виявляти подібними методами. Це обмеження також стосується обфускованих даних.

Альтернативним підходом, який може вирішити ці проблеми, є використання евристичних методів які полягають в аналізі поведінки процесів. Фактично, фокус зміщується з зовнішнього вигляду подій та їх структури на аналіз того, що саме відбувається та які закономірності з цим пов'язані. Найпростішими представниками цієї групи є статистичні методи, що використовують різні математичні критерії для виявлення нестандартної поведінки мережі чи окремих процесів в ній для виявлення аномалій та вторгнень. До евристичних підходів також можна віднести методи аналізу часових рядів та контрольні карти, які дозволяють побудувати шаблони нормальної поведінки середовища на основі наявних даних про його роботу в різних режимах для подальшого виявлення подій виходу за ці встановлені обмеження. Зазначені підходи дозволяють працювати з загрозами незалежно від того, який алгоритм чи програмний код

використовувався в процесі їх виконання, адже увага зосереджується саме на подіях.

Незважаючи на очевидні переваги класичні евристичні методи досить важко працюють зі складними закономірностями, які передбачають аналіз великого набору даних, наприклад, мережних пакетів з десятками атрибутів. Розглянуті підходи також потребують постійного оновлення статистичних показників для адаптації до змінюваних умов та режимів роботи мережі. Крім того, зазвичай навчальні дані для аналізу різного роду реальних мережних атак обмежені та мають значний дисбаланс класів, а розглянуті методи при недостатній кількості прикладів зразків атак можуть давати велику кількість хибних спрацювань або пропускати складні аномалії.

Саме тому для вирішення цих проблем необхідно застосовувати більш складні підходи, зокрема методи машинного навчання, які у задачах виявленні мережних вторгнень [6] мають низку ключових переваг: вони здатні автоматично виявляти складні закономірності у великих обсягах даних, адаптуватися до нових типів атак, забезпечують високу точність класифікації та масштабованість для роботи з різноманітними мережевими середовищами.

Для досягнення більш стабільних і точних результатів використання машинного навчання за умови дисбалансу класів необхідно застосовувати додаткові підходи, зокрема методи перебалансування даних, до яких належать SMOTE [7], а також ансамблеві алгоритми [8], які дозволяють покращити узагальнюючу здатність моделей і підвищити якість класифікації міноритарних класів.

**Постановка проблеми.** Основна мета поточного дослідження полягає в аналізі ефективності використання різних методів підвищення якості класифікації мережних вторгнень за умови обмежених та незбалансованих вхідних даних, коли кількість об'єктів одного класу значно переважає інші. Завдяки цьому стає нагальною потреба в розробці та вдосконаленні такого методу, який би дозволив розрізнити як об'єкти мажоритарного класу, так і об'єкти міноритарного класу. Для виконання поставленої мети необхідно дослідити наступні напрямки підвищення ефективності роботи методів машинного навчання в умовах дисбалансу в навчальних даних:

1) використання підходів попередньої обробки даних, що полягають у перебалансуванні наявних екземплярів;

2) застосування ансамблевих методів з метою підвищення стабільності моделі та покращення її здатності розрізнити об'єкти міноритарних класів завдяки окремим спеціалізованим класифікаторам, які об'єднуються у групи;

3) комплексне використання зазначених підходів.

Для вирішення сформульованих задач необхідно діяти таким чином:

1) дослідити обраний набір даних, розподіл класів, розкид значень та інші статистичні характеристики;

2) розглянути ефективність роботи класичних методів машинного навчання в задачі бінарної (нормальний і аномальний стан мережі) та мультикласової

класифікації (нормальний стан та декілька видів мережних атак);

3) перевірити здатність методу перебалансування даних та підходу з використанням ансамблів впливати на якість виявлення окремих класів в обох підзадачах;

4) використати обидві стратегії в комплексі для оцінки їх ефективності підвищення якості класифікації;

5) сформулювати висновки стосовно виявлення мережних вторгнень в умовах незбалансованих тренувальних наборів.

Виконання поставлених кроків дозволить отримати набір рекомендацій для подальших досліджень з комплексним використанням спеціалізованих методів попередньої обробки даних та ансамблевих класифікаторів.

### Огляд підходів та методів

В узагальненому вигляді проблему класифікації мережних вторгнень можна представити у вигляді задачі пошуку вирішального правила, яке дозволяє зв'язати набір ознак з певною результируючою міткою. В такому випадку з метою формалізації представимо  $f(x)$  як модель класифікації, яка дозволяє отримати вхідний вектор ознак  $x$  і повернути значення відповідного класу. В такому випадку саме вирішальне правило набуває наступного вигляду:

$$\hat{y} = \arg \max_{c \in C} P(c | x), \quad (1)$$

де  $\hat{y}$  – передбачений клас;  $C$  – множина можливих класів;  $x$  – об'єкт, представлений множиною вхідних ознак;  $P(C | x)$  – ймовірність належності об'єкта  $x$  до класу  $c$ ;  $\arg \max$  – функція вибору мітки класу з найбільшою ймовірністю.

Якщо множина  $C$  містить більше двох елементів (наприклад, види атак: "SQL Injection", "Bruteforce", "XSS" тощо), то в такому випадку низька вірогідність приналежності до одного з класів не дає відповіді на запитання, до якої категорії віднести той чи інших об'єкт, бо є ще мінімум два варіанти. Задачі такого роду особливо ускладнюються при наявності дисбалансу класів у використовуваних наборах даних.

Першим кроком вирішення цієї проблеми може бути використання спеціалізованих методів попередньої обробки незбалансованих даних. Одним з найпопулярнішою у цій категорії є SMOTE, який передбачає генерацію нових екземплярів шляхом інтерполяції між випадковими точками меншості та їхніми найближчими сусідами того ж класу. Цю процедуру можна формалізувати наступним чином:

$$\tilde{x} = x_i + \delta \cdot (x_{NN} - x_i), \quad (2)$$

де  $\tilde{x}$  – новий синтетичний екземпляр класу;  $x_i$  – існуючий зразок міноритарного класу; один із  $x_{NN}$   $k$ -найближчих сусідів  $x_i$  того ж класу;  $\delta$  – коефіцієнт інтерполяції (зазвичай випадковий) на інтервалі від 0 до 1.

Наступним важливим кроком підвищення ефективності роботи з незбалансованими даними є використання ансамблевих методів. Вони дозволяють об'єднувати прогнози кількох базових моделей, зменшуючи ймовірність помилки, покращуючи стійкість до шуму та підвищуючи загальну точність класифікації. Завдяки різноманітності підходів до формування

ансамблю (наприклад, беггінг, бустинг), ці методи здатні краще виявляти складні шаблони навіть за умов дисбалансу.

Узагальнений процес об'єднання декількох моделей машинного навчання в ансамбль формалізується наступним виразом:

$$f(x) = \sum_{m=1}^M \alpha_m f_m(x), \quad (3)$$

де  $f_m(x)$  – прогноз  $m$ -ї базової моделі;  $\alpha_m$  – невід'ємна вага моделі  $m$ , що відображає її вплив у ансамблі;  $M$  – кількість моделей в ансамблі.

Ідея беггінг-ансамблів [9] полягає у навчанні кожної моделі  $f_m^*(x)$  на випадковій вибірці з повторами. Ця процедура отримала назву бутстреп. В подальшому прогнози цих моделей об'єднуються за допомогою рівноважного голосування, що формалізується наступним виразом:

$$f_{\text{bagging}}(x) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M f_m^*(x), \quad (4)$$

де  $f_m^*(x)$  – прогноз  $m$ -ї базової моделі;  $M$  – кількість моделей в ансамблі.

Однією з варіацій беггінг-ансамблів є метод випадкового лісу (Random Forest), який об'єднує дерева рішень та при навчанні кожного з них додатково випадково вибирає підмножину ознак  $\theta_m$ . В такому випадку процес формування результуючого прогнозу формалізується наступним виразом:

$$f_{RF}(x) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M f_m^*(x, \theta_m), \quad (5)$$

де  $f_m^*(x; \theta_m)$  – прогноз  $m$ -ї базової моделі, що навчалася з випадковою підмножиною ознак  $\theta_m$ ;  $M$  – кількість моделей в ансамблі.

З іншого боку ідея бустинг ансамблів полягає у почерговому покращенні наступних моделей з врахуванням помилок попередніх. AdaBoost [10] створює ансамбль послідовно навчених слабких моделей  $f_m^*$ , кожна з яких приділяє більше уваги прикладам, важким для попередніх моделей. В такому випадку фінальне прогнозування представляється таким виразом:

$$f_{Ada}(x) = \text{sign}(\sum_{m=1}^M \alpha_m \cdot f_m^*(x)), \quad (6)$$

де  $f_m^*(x)$  – прогноз  $m$ -ї базової моделі;  $\alpha_m$  – вага базової моделі в ансамблі;  $M$  – кількість моделей в ансамблі.

Ваговий коефіцієнт відображає, наскільки ансамбль довіряє конкретній моделі. Він розраховується за наступним виразом на основі похибки конкретного базового класифікатора:

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_m} \right), \quad (7)$$

де  $\varepsilon_m$  – зважена помилка класифікатора  $f_m^*$  та відображає частку об'єктів, які були класифіковані неправильно з урахуванням поточних ваг  $w_i$  прикладів.

Зважена помилка розраховується таким чином:

$$\varepsilon_m = \sum_{i=1}^N w_i \cdot I(f_m^*(x_i) \neq y_i), \quad (8)$$

де  $N$  – кількість прикладів;  $w_i$  – ваговий коефіцієнт прикладу;  $I$  – індикаторна функція (1, якщо класифіковано неправильно, 0 – в зворотному випадку);  $f_m^*(x)$  – прогноз  $m$ -ої базової моделі

Інший ансамблевий метод градієнтного бустингу [11] будує модель поступово, додаючи на кожному

кроці наступну слабку модель  $f_m^*$ , яка апроксимує негативний градієнт функції втрат  $L$ . Для цього за наступним виразом обчислюється негативний градієнт функції втрат за прогнозом попередньої моделі (псевдо-резидуал):

$$r_{im} = - \left[ \frac{\partial \ell(y_i, F(x_i))}{\partial F(x_i)} \right]_{F(x_i)=F_{m-1}(x_i)}, \quad (9)$$

де  $r_{im}$  – псевдо-резидуал для об'єкта  $i$  на ітерації  $m$ ;  $\ell(y_i, F(x_i))$  – функція втрат між справжнім значенням  $y_i$  та прогнозом  $F(x_i)$ ;  $F_{m-1}(x_i)$  – прогноз моделі на попередній ітерації.

На кожному кроці алгоритму побудована модель апроксимує псевдо-резидуали та додається до поточного ансамблю з відповідним коефіцієнтом масштабування. Цей процес в градієнтному бустингу можна формалізувати у вигляді наступного виразу:

$$F_m(x) = F_{m-1}(x) + \gamma_m \cdot h_m(x), \quad (10)$$

де  $F_m(x)$  – оновлений прогноз після  $m$  ітерацій;  $\gamma_m$  – коефіцієнт, який визначає вагу нової моделі;  $h_m(x)$  – слабка модель, побудована для апроксимації  $r_{im}$ ;  $F_{m-1}(x)$  – прогноз попередньої моделі.

Після завершення всіх ітерацій, фінальний прогноз моделі є сумою початкового припущення та всіх побудованих слабких моделей, що відображається у наступному виразі:

$$f_{\text{gradient}}(x) = f_0(x) + \sum_{m=1}^M \gamma_m \cdot f_m^*(x), \quad (11)$$

де  $f_{\text{gradient}}(x)$  – фінальний прогноз ансамблю;  $f_0(x)$  – початкове значення (наприклад, середнє по  $y$ );  $M$  – кількість ітерацій (слабких моделей);  $\gamma_m$  – ваговий коефіцієнт окремої моделі;  $f_m^*(x)$  – прогноз окремої моделі на ітерації  $m$ .

### Формулювання теоретичних очікувань

Існує багато різних метрик для оцінювання якості класифікації, проте в умовах дисбалансу класів, коли цільовий (наприклад, тип мережевої атаки) є менш представленим, доцільно використовувати Recall як основну метрику, оскільки вона фокусує увагу на здатності моделі виявляти саме важливий міноритарний клас [12].

Використання методу синтетичного збільшення (передискретизації) вибірки меншості (SMOTE) дозволить зменшити вплив дисбалансу класів у тренувальній вибірці, підвищити Recall для міноритарних класів, зокрема таких атак, як XSS, SQL Injection або Infiltration, які у початковому датасеті представлені значно меншою кількістю прикладів, а також покращити стійкість класифікаторів до хибних негативних рішень.

Використання ансамблів, в свою чергу, має забезпечити підвищення точності та стабільності результатів класифікації завдяки поєднанню рішень багатьох слабких моделей, а також має забезпечити кращу здатність до узагальнення та зниження ймовірності перенавчання, яке часто виникає при використанні одиночних моделей на складних даних, особливо за умови значної переваги одного з класів.

Комплексне застосування SMOTE та ансамблів не лише має покращити окремі аспекти якості класифікації, а й створити надійнішу, збалансованішу та практично орієнтовану модель, здатну до ефективного виявлення як поширених, так і рідкісних атак в умовах

аналізу реального мережевого трафіку. Очікується зростання показника Recall для меншоритарних класів, без істотного погіршення точності для мажоритарного класу. При цьому прогнозується отримання кращої здатності розрізняти близькі за характеристиками типи атак, що є слабким місцем при використанні окремих моделей без попереднього перебалансування.

### Експериментальні дослідження

Перша етап експерименту полягає у аналізі набору даних та виявленні основних його характеристик. В рамках дослідження було використано публічний датасет мережевого трафіку CIC-IDS2017 [13], який був створений Канадським інститутом кібербезпеки (CIC) для дослідження виявлення вторгнень, що містить як нормальну активність, так і різноманітні типи мережевих атак у контрольованому середовищі. З нього було взято два набори даних, кожен з яких відповідає за певний день тижня та час, а також за конкретний вид загрози. Для підвищення об'єктивності дослідження було прийнято рішення обрати дослідження стану мережі у четвер, а саме набори Thursday-WorkingHours-Morning-WebAttacks та Thursday-WorkingHours-Afternoon-Infiltration. Перший набір даних є багатокласовим та зберігає дані як нормально стану мережі, так і опис характеристик мережі під час 3-х видів веб-атак, а саме: Bruteforce (метод атаки, при якому зловмисник випробовує всі можливі комбінації логінів і паролів для отримання несанкціонованого доступу до системи), XSS (міжсайтовий скриптинг, що дозволяє виконати шкідливий код на вебсторінці) та SQL Injection (використання шкідливих SQL-запитів). Цей датасет дозволяє дослідити особливості багатокласової класифікації в предметній галузі. Другий набір містить дані, що відповідають нормальному стану мережі, а також окремі приклади атаки Infiltration (проникнення, при якому дії зловмисника спрямовані на отримання несанкціонованого доступу до окремої комп'ютерної системи або мережі). Таким чином, цей датасет дозволяє дослідити особливості бінарної класифікації в предметній галузі.

Для дослідження характеристик наборів даних було виконано аналіз розподілу міток, а також розкиду значень атрибутів та оцінки кореляції між ними. Для останнього показника використовувалось значення сумарного показника кореляції.

На рис. 1–3 представлені результати дослідження характеристик набору даних, що відповідає за атаку типу Infiltration. На рис. 4–6 представлені результати дослідження характеристик набору даних, що відповідає за декілька видів вебатак.

Таким чином, як видно з наведених графічних залежностей, обидва набори даних мають певні вади: в першу чергу велику кореляцію окремих атрибутів, широкий розкид значень, а також дисбаланс у мітках. В такому разі за результатами першого етапу експериментального дослідження можна стверджувати, що для вдалого виконання як бінарної, так і багатокласової класифікації необхідно буде застосувати розглянуті раніше підходи для підвищення ефективності класифікації з використанням даних, що мають зазначені вади.

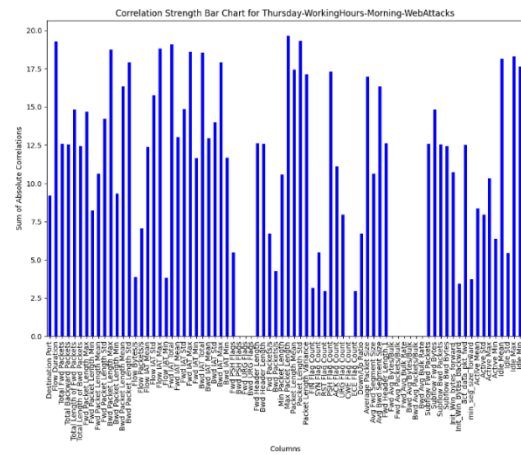


Рис. 1. Сумарний показник кореляції з-поміж атрибутів в наборі даних, що відповідає за атаку типу Infiltration

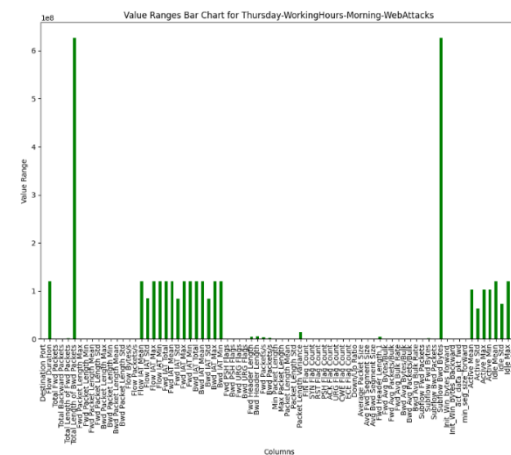


Рис. 2. Розкид значень атрибутів набору даних, що відповідає за атаку типу Infiltration

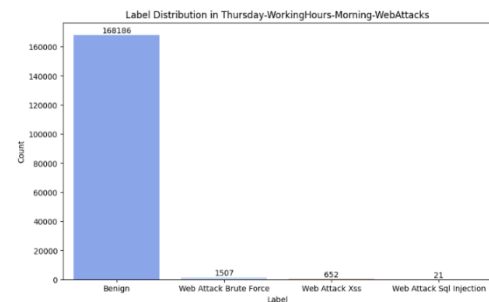


Рис. 3. Розподіл міток класів набору даних, що відповідає за атаку типу Infiltration

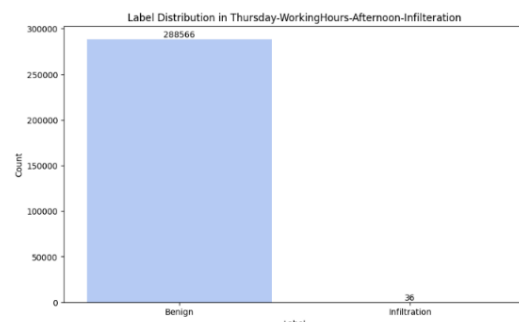


Рис. 4. Розподіл міток класів набору даних, що відповідає за декілька видів вебатак

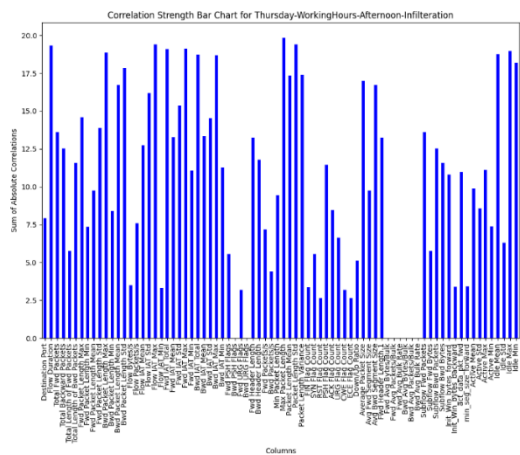


Рис. 5. Сумарний показник кореляції з-поміж атрибутів в наборі даних, що відповідає за декілька видів вебатак

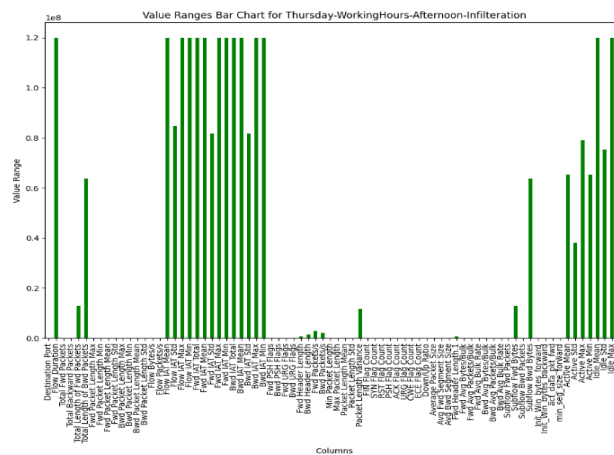


Рис. 6. Розкид значень атрибутів набору даних, що відповідає за декілька видів вебатак

Другий етап експериментального дослідження полягав у оцінці ефективності класифікації різними методами машинного навчання без використання додаткових технік зі стандартними налаштуваннями. Для цього були відібрані класифікатори, що працюють на принципах логістичної регресії, методу опорних векторів, методу К-найближчих сусідів та з використанням дерев рішення. Для кожного з них

було використано два раніше розглянутих наборів даних, а також за результатами навчання та тестування побудовано графіки, що відображають основні показники якості, а саме Recall та F1-Score. На рис. 7 представлено результати оцінки якості класифікації з використанням методів машинного навчання для набору даних, що відповідає за атаку типу Infiltration або «проникнення» та за декілька видів вебатак.

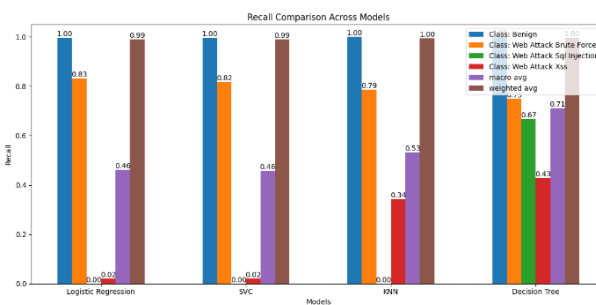
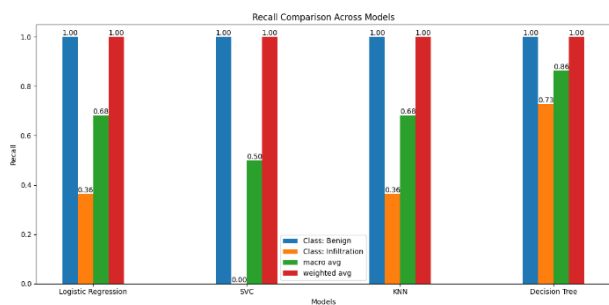


Рис. 7. Значення метрики Recall для результатів класифікації методами машинного навчання для набору даних, що відповідає за атаку типу Infiltration (зліва) та за декілька видів вебатак (справа)

За результатами дослідження отримано, що для задачі виявлення атаки типу Infiltration усі базові моделі, зокрема Logistic Regression, SVC, KNN та Decision Tree, досягають максимального значення метрики Recall для нормального трафіку. Проте значення цього показника якості для класу атаки суттєво нижчі: моделі Logistic Regression та KNN продемонстрували результат 0.36, Decision Tree – 0.73 (найкращий показник), а SVC взагалі не зміг побудувати модель. У випадку мультикласової задачі спостерігається ще помітніше падіння Recall для міноритарних класів. Наприклад, для атаки типу SQL Injection 3 з 4 моделей не змогли отримати значення, більше за 0, а модель Decision Tree продемонструвала результат на рівні 0.67 (найкращий результат). Для атаки типу XSS жодна з моделей не продемонструвала результат більший за 0.43. Трішки кращі результати були отримані при класифікації атаки Brute Foresec – до 0.83, що пов'язано з більшою кількістю екземплярів навчальної вибірки. Лише для класу Benign (нормальний стан мережі) усі моделі досягають стабільно високих значень. Такі результати свідчать про те, що в умовах суттєвого дисбалансу в датасеті базові методи

машинного навчання неспроможні ефективно виявляти малочисельні класи атак, а тому навіть незначна зміна в їхньому характері може спричинити істотне зниження якості виявлення. Таким чином, для досягнення прийнятної якості класифікації атак потрібно впроваджувати стратегії перебалансування вибірки та вдосконалення архітектури моделей.

Третій етап дослідження полягав у дослідженні ефективності методів підвищення якості бінарної та багатокласової класифікації з використанням деяких підходів в умовах дисбалансу набору даних. Перший підхід полягав у використанні попередньої обробки даних з перебалансуванням, що передбачало застосування методу SMOTE. Результати оцінки якості класифікації для обох наборів даних представлені на рис. 8.

Наступний підхід полягав у використанні ансамблевих класифікаторів, що об'єднують в собі прості моделі машинного навчання. На рис. 9 представлені результати оцінки якості класифікації з використанням ансамблевих методів машинного навчання для обох наборів даних.

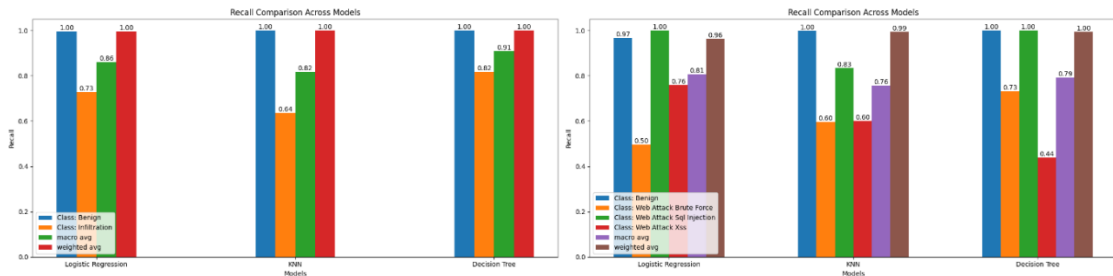


Рис. 8. Значення метрики Recall для результатів класифікації методами машинного навчання з застосуванням методу SMOTE для набору даних, що відповідає за атаку типу Infiltration (зліва) та за декілька видів атак (справа)

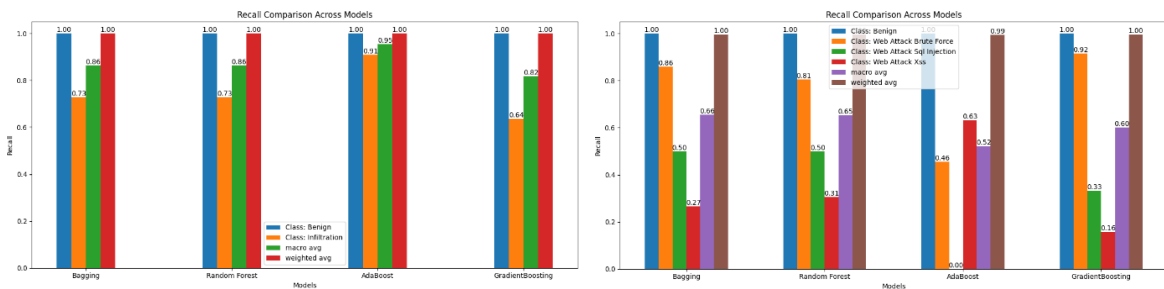


Рис. 9. Значення метрики Recall для результатів класифікації ансамблевими методами машинного навчання для набору даних, що відповідає за атаку типу Infiltration (зліва) та за декілька видів атак (справа)

Отримані результати продемонстрували, що балансування вибірки з використанням методу SMOTE для задач бінарної та мультикласової класифікації дозволяє збільшити значення метрики Recall для атаки типу Infiltration: Logistic Regression до 0.73, KNN до 0.64, Decision Tree до 0.82. Водночас Recall для класу Benign залишився стабільно високим для всіх моделей. У випадку мультикласової задачі також спостерігається покращення результатів для класів мережевих атак. Наприклад, для XSS метрика Recall зросла із майже нульового значення до 0.76, а для Brute Force – до 0.86 та 0.92 у випадку Bagging та Gradient Boosting відповідно. Проте не вдалося отримати кращих результатів для SQL Injection. Застосування ансамблевих методів класифікації, що поєднують кілька простих моделей машинного навчання при виявленні атаки типу Infiltration продемонструвало високі значення метрики

Recall, наприклад 0.86 для Bagging та 0.91 для AdaBoost при еталонних показниках для нормального трафіку. У задачі мультикласової класифікації ансамблеві моделі також продемонстрували кращі результати порівняно з базовими: для атак типу XSS та Brute Force Recall зріс до 0.63 та 0.92 відповідно, проте залишився низьким для атаки SQL Injection.

Отже, обидва підходи забезпечили збільшення обраної метрики якості для більшості класів атак, проте не вдалося досягти таких результатів для SQL Injection класу. Саме тому було прийнято рішення перевірити, наскільки їх комбінація може вплинути на якість класифікації.

На рис. 10 представлені результати оцінки якості класифікації з комплексним використанням методу синтетичного перебалансування та ансамблевих класифікаторів.

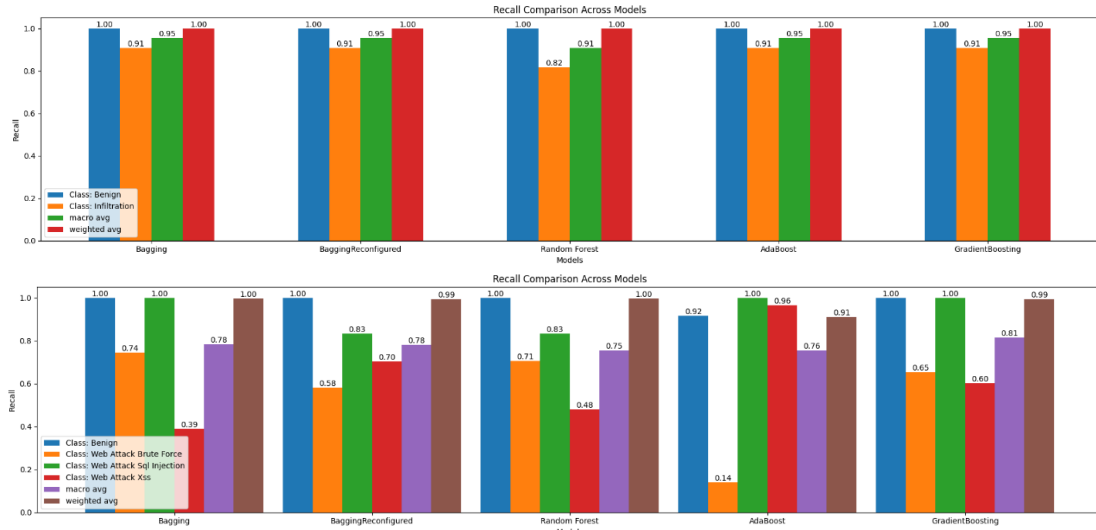


Рис. 10. Значення метрики Recall для результатів з комплексним використанням методу синтетичного перебалансування та ансамблевих класифікаторів для набору даних, що відповідає за атаку типу Infiltration (зверху) та за декілька видів атак (знизу)

Реалізація комплексного поєднання двох підходів (перебалансування даних методом SMOTE та подальша класифікація з використанням ансамблевих моделей) дозволила отримати кращі показники якості для обох задач. Результати бінарної класифікації продемонстрували найкращі значення Recall для всіх моделей для нормального трафіку – 1.00, а також від 0.82 до 0.91 для атаки Infiltration, що призвело до отримання найбільших значень Recall macro average на рівні 0.91-0.95. У випадку мультикласової задачі спостерігається вдосконалене загальне покриття для міноритарних класів з атаками: Recall для SQL Injection досяг 1.00 (Bagging, AdaBoost, Gradient Boosting), Brute Force – до 0.74 (Bagging), а XSS – до 0.96 у моделі AdaBoost. Крім того, вдалося досягти значення Recall macro avg на рівні 0.78 для моделі Bagging та 0.81 для моделі Gradient Boosting.

Ці результати підтверджують, що поєднання методів синтетичного перебалансування з ансамблевими класифікаторами є найбільш ефективною стратегією, яка дозволяє досягти високої чутливості як для основного класу, так і для рідкісних типів атак, представлених міноритарними екземплярами. Такий підхід забезпечує загальну стабільність і узгодженість результатів. Це критично важливо в умовах високої варіативності та дисбалансу мережевих атак, особливо коли система має бути чутливою до декількох рідкісних сценаріїв з обмеженим представленням у тренувальних даних.

### Оцінка результатів та формування рекомендацій для подальших досліджень

Проведений аналіз показав, що при значному дисбалансі даних традиційні алгоритми машинного навчання втрачають здатність ефективно розпізнавати рідкісні типи мережевих атак. Це особливо помітно у випадку з класами, які представлені мінімальною кількістю прикладів у навчальній вибірці. Початкове значення метрики Recall для Infiltration для деяких методів становило лише 0.36 та 0.73 для дерев рішення, тоді як для XSS цей показник не перевищував 0.43, а для SQL Injection 0.67. Більш високі результати було отримано для Brute Force атаки, де максимально значення Recall склало 0.83.

Застосування методу SMOTE для штучного збільшення обсягу даних міноритарних класів дало відчутний ефект. Recall для Infiltration підвищився до 0.73 у Logistic Regression та до 0.82 у Decision Tree. Для XSS показник зріс до 0.76, а для Brute Force – до 0.92 у моделі Gradient Boosting. При цьому значення для класу SQL Injection також значно збільшилося, а для класу Benign залишилося стабільно високим, що свідчить про відсутність негативного впливу перебалансування на основний клас.

Покращення результатів також вдалося досягти завдяки поєднанню SMOTE з ансамблевими підходами. У задачі бінарної класифікації Recall для нор-

мального трафіку досягав 1.00, а для Infiltration коливався в межах 0.82-0.91, що забезпечило Recall macro average на рівні 0.91-0.95. У мультикласовій класифікації також спостерігалось помітне зростання показників: Recall для SQL Injection піднявся до 1.00 (у моделях Bagging, AdaBoost та Gradient Boosting), для XSS – до 0.96 (AdaBoost), для Brute Force – до 0.74 (Bagging). Значення Recall macro average при цьому становили 0.78–0.81, що є істотним покращенням у порівнянні з базовими моделями.

Отримані результати свідчать, що поєднання синтетичного перебалансування та ансамблевих методів є дієвою стратегією для задач виявлення мережевих атак в умовах дисбалансу класів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на глибше вивчення поведінки таких моделей у сценаріях зі змінними характеристиками мережевого трафіку та у випадках, коли нові типи атак з'являються в процесі або після навчання класифікаційної системи. Особливу увагу варто приділити оптимізації параметрів SMOTE для кожного конкретного класу. Також перспективним є застосування гібридних ансамблів, що поєднують сильні сторони різних алгоритмів, аби зменшити ризик падіння якості для окремих класів при загальному зростанні середніх показників.

Зрештою, метою подальших робіт має бути створення систем, здатних підтримувати високу точність і стабільність результатів навіть у складних умовах, коли розподіл даних є нерівномірним, а характер атак постійно змінюється.

### Висновки

В рамках дослідження було перевірено декілька способів покращення роботи класифікаторів для виявлення різних мережевих атак. Для цього використовувалися набори даних з дисбалансом класів-атак, а також методи попередньої обробки з перебалансуванням та різні методи машинного навчання, у тому числі ансамблеві алгоритми. Найкращі результати дало поєднання синтетичного балансування (SMOTE) з ансамблевими моделями, такими як чистий Bagging, Random Forest і Gradient Boosting. Це дозволило значно підвищити чутливість до рідкісних атак, зокрема XSS та SQL Injection, а також утримати високу точність для нормального трафіку.

Порівняно з базовими моделями без перебалансування, запропонований комплексний підхід покращив значення метрики Recall на 18% для атаки Infiltration, на 33% для атаки SQL Injection та до 53% для атаки XSS у порівнянні з базовими моделями машинного навчання без додаткового перебалансування вхідних даних. Отримані результати підтверджують, що комбінування спеціалізованих методів обробки даних із сучасними ансамблевими алгоритмами є ефективним рішенням для виявлення мережевих атак у реальних умовах, де дані по різних станам часто є нерівномірно розподіленими.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Akamai Technologies, Inc., "Fighting the Heat: EMEA's Rising DDoS Threats," State of the Internet / Security, vol. 10, no. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.akamai.com/content/dam/site/en/documents/state-of-the-internet/2023/2024/akamai-soti-2024-emea-ddos-report.pdf>. Accessed: Jul. 27, 2025.

2. С. М. Лисенко & Р. В. Щука, "Аналіз методів виявлення шкідливого програмного забезпечення в комп'ютерних системах," Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, no. 2, pp. 101–107, 2020, doi: 10.31891/2307-5732-2020-283-2-101-107.
3. L. Diana, P. Dini, and D. Paolini, "Overview on Intrusion Detection Systems for Computers Networking Security," Computers, vol. 14, no. 3, p. 87, 2025, doi: 10.3390/computers14030087.
4. Y. Otoum and A. Nayak, "AS-IDS: Anomaly and Signature Based IDS for the Internet of Things," Journal of Network and Systems Management, vol. 29, p. 23, 2021, doi: 10.1007/s10922-021-09589-6.
5. N. Naik, P. Jenkins, N. Savage, L. Yang, K. Naik and J. Song, "Embedding Fuzzy Rules with YARA Rules for Performance Optimisation of Malware Analysis," 2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Glasgow, UK, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/FUZZ48607.2020.9177856.
6. О. Заковоротний та А. Хулап, "АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ВИЯВЛЕННЯ ВТОРГНЕНЬ НА ОСНОВІ НЕЙРОМЕРЕЖ У СИСТЕМАХ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ," Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 2(80), сс. 125-131, doi: 10.26906/SUNZ.2025.2.125.
7. С. Гавриленко, В. Зогуля, В. Омельченко, "ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ КЛАСИФІКАЦІЇ НА НЕЗБАЛАНСОВАНИХ ДАНИХ", Системи управління навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 2(72), сс. 87-91, 2023, doi: 10.26906/SUNZ.2023.2.087.
8. O. Hornostal and S. Gavrylenko, "Application of heterogeneous ensembles in problems of computer system state identification," Advanced Information Systems, vol. 7, no. 4, pp. 5–12, Dec. 2023, doi: 10.20998/2522-9052.2023.4.01.
9. O. Hornostal and S. Gavrylenko, "Development of a method for identification of the state of computer systems based on bagging classifiers," Advanced Information Systems, vol. 5, no. 4, pp. 5–9, Dec. 2021, doi: 10.20998/2522-9052.2021.4.01.
10. H. Chandrasekaran, K. Murugesan, S. C. Mana, B. K. U. A. Barathi, and S. Ramaswamy, "Handling imbalanced data in intrusion detection using time weighted Adaboost support vector machine classifier and crossover boosted Dwarf Mongoose Optimization algorithm," Applied Soft Computing, vol. 167, p. 112327, 2024.
11. R. Vaishali, "A Hybrid Gradient Boost Model for Intrusion Detection," in Proc. 2023 7th Int. Conf. on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), Erode, India, 2023, pp. 1106–1111, doi: 10.1109/ICCMC56507.2023.10084018.
12. V. Chelak, O. Hornostal, Y. Chelak, and S. Gavrylenko, "ADVANCED METHODS FOR CLASSIFICATION QUALITY ASSESSMENT LEVERAGING ROC ANALYSIS AND MULTIDIMENSIONAL CONFUSION MATRIX," Advanced Information Systems, vol. 9, no. 1, pp. 24–34, 2025, doi: 10.20998/2522-9052.2025.1.03.
13. R. Panigrahi and S. Borah, "A detailed analysis of CICIDS2017 dataset for designing Intrusion Detection Systems," International Journal of Engineering & Technology, vol. 7, no. 3.24, pp. 479–482, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i3.24.22797.

Received (Надійшла) 23.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.08.2025

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Горносталь Олексій Андрійович** – PhD, асистент кафедри "Комп'ютерна інженерія та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

**Oleksii Hornostal** – PhD, Assistant Professor of Department of "Computer Engineering and Programming", National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [gornostalaa@gmail.com](mailto:gornostalaa@gmail.com); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5820-9999>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57189040595>.

**Челак Віктор Володимирович** – PhD, доцент кафедри "Комп'ютерна інженерія та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

**Viktor Chelak** – PhD, Associate Professor of Department of "Computer Engineering and Programming", National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [victor.chelak@gmail.com](mailto:victor.chelak@gmail.com); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8810-3394>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216331944&origin=resultslist>.

#### Classification of network attacks using machine learning methods in conditions of training data imbalance

Oleksii Hornostal, Viktor Chelak

**Abstract.** The object of the research is the process of detecting network intrusions. The subject of the research is methods for classifying network intrusions. The aim of the research is to improve the quality and speed of ensemble classifiers in network intrusion classification problems under conditions of imbalance in training data. **Methods used:** machine learning methods, data preprocessing methods, ensemble classifiers, rebalancing method by synthetic minority augmentation. **Results obtained:** the effectiveness of using various approaches for classifying network intrusions under conditions of class imbalance in the training sample was investigated. A comprehensive approach was proposed, which involves preprocessing data using the SMOTE method for synthetic balancing of the training sample, as well as its subsequent analysis using ensemble machine learning models, which made it possible to improve the classification performance of minority classes. The best results were obtained when combining SMOTE with ensemble models, in particular Bagging, Gradient Boosting and AdaBoost. **Conclusions.** Based on the results of the study, an improved approach to network traffic classification was proposed, which combines pre-sampling by the SMOTE method with ensemble algorithms bagging and boosting. The combined use of these methods allowed to improve the value of the Recall metric for minority classes. Overall, the proposed approach provided an improvement in the classification quality: 18% for the Infiltration attack, 33% for the SQL Injection attack and up to 53% for the XSS attack compared to basic machine learning models without additional rebalancing of input data.

**Keywords:** network attacks, classification, machine learning, ensembles, bagging, boosting, quality metrics, SMOTE.

S. Datsenko

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

## NEURAL ARCHITECTURE COMPARISON FOR FACT VERIFICATION ON FEVER DATASET

**Abstract.** The exponential growth of misinformation and fake news across digital platforms poses unprecedented challenges to information integrity, requiring sophisticated automated fact-checking systems capable of verifying claims against reliable evidence sources with high accuracy and computational efficiency. This study **aims** to evaluate and compare four hybrid neural architectures (BiLSTM-CNN, BiLSTM-RNN, BiLSTM-GRU, and BiLSTM-GNN) for automated fact verification using the FEVER dataset, investigating their effectiveness in claim-evidence verification under GPU memory constraints while analyzing training dynamics and generalization capabilities. The following **results** are obtained: The BiLSTM-CNN architecture achieved optimal performance with 79.5% accuracy, 79.5% recall, 77.9% F1-score, and 93.4% AUC-ROC, followed by BiLSTM-GNN (78.9% accuracy, 93.3% AUC-ROC) and BiLSTM-GRU (77.9% accuracy, 92.2% AUC-ROC), while BiLSTM-RNN exhibited catastrophic failure (33.3% accuracy). All successful architectures demonstrated significant overfitting with 15-17% train-validation accuracy gaps, indicating systematic generalization challenges with limited training data (40,000 samples). **Conclusion.** Multi-kernel convolutional feature extraction proves most effective for local pattern recognition in fact verification, while graph-inspired approaches show promising potential for relational reasoning. The consistent overfitting across architectures highlights the critical need for enhanced regularization, data augmentation, and ensemble methods to achieve robust performance in automated fact-checking systems under computational constraints.

**Keywords:** fact verification, neural networks, FEVER dataset, hybrid architectures, graph neural networks, bidirectional LSTM.

### Introduction

The proliferation of misinformation and fake news across digital platforms poses significant threats to public discourse, democratic processes, and societal well-being. Automated fact-checking systems have emerged as critical tools for combating this challenge, employing various computational approaches to verify claims against reliable evidence sources. Current fake news detection methodologies encompass content-based analysis examining linguistic patterns and semantic inconsistencies, social context-based approaches analyzing propagation patterns and user behavior, and hybrid methods combining textual and multimedia evidence. Deep learning architectures, particularly recurrent neural networks (RNNs), convolutional neural networks (CNNs), and graph neural networks (GNNs), have demonstrated substantial effectiveness in identifying deceptive content through sophisticated pattern recognition and feature extraction capabilities. The FEVER (Fact Extraction and VERification) dataset represents a pivotal benchmark in this domain, providing a standardized framework for evaluating automated verification systems against evidence retrieved from Wikipedia. This work contributes to the advancement of fact verification research by conducting a comprehensive comparison of hybrid neural architectures, combining bidirectional LSTM processing with CNN, RNN, GRU, and graph-based components, thereby exploring the effectiveness of different neural paradigms for claim verification tasks under computational constraints.

Recent advances in automated fact verification have been driven by large-scale datasets like FEVER [1] and sophisticated neural architectures. The FEVER dataset, introduced by Thorne et al. [1], established a benchmark containing 185,445 claims verified against Wikipedia, achieving 0.6841 Fleiss  $\kappa$  inter-annotator

agreement. Early baseline systems achieved only 31.87% accuracy with correct evidence and 50.91% without evidence selection [1], highlighting the task's complexity.

**Neural Semantic Matching Approaches.** Nie et al. [2] introduced neural semantic matching networks that jointly conduct document retrieval, sentence selection, and claim verification, achieving state-of-the-art results by integrating semantic relatedness scores and WordNet features. This work demonstrated the importance of end-to-end optimization across all verification stages.

**RNN and CNN-Based Approaches.** Recurrent and convolutional neural networks have formed the backbone of many fact verification systems. Research shows that bidirectional LSTM models achieve superior performance over unidirectional approaches and vanilla RNNs [3, 4]. Sastrawan et al. [4] demonstrated that Bidirectional LSTM outperformed CNN and ResNet architectures across multiple fake news datasets. The effectiveness of CNN-LSTM hybrid models has been validated across different domains [5, 6], with architectures combining convolutional feature extraction and LSTM temporal modeling achieving high accuracy rates (96-98%) in news verification tasks.

**Hybrid Neural Architectures.** Recent work has focused on combining multiple neural paradigms for improved performance. Hybrid CNN-RNN models [7] demonstrate superior results by leveraging CNNs' parallel processing capabilities for feature extraction alongside RNNs' sequential modeling strength. Research indicates that ensemble methods combining different neural architectures can significantly outperform individual models [8, 9], with voting mechanisms and stacking approaches achieving substantial accuracy improvements.

**Graph-Based Reasoning.** Graph neural networks have emerged as powerful tools for fact verification.

Velickovic et al. [10] introduced Graph Attention Networks (GATs), enabling nodes to attend over neighborhood features without costly matrix operations. Recent advances include GATv2 [11], which addresses static attention limitations in original GAT architectures. Applied to fact verification, Wu et al. [12] developed evidence-aware hierarchical interactive attention networks, while Xu et al. [13] proposed GET framework using graph-based semantic structure mining to address scattered information integration challenges.

**Attention Mechanism Evolution:** The evolution of attention mechanisms has significantly impacted fact verification. Comprehensive surveys [14, 15] reveal three developmental stages: graph recurrent attention networks, graph attention networks, and graph transformers. Recent work has focused on improving attention expressiveness [11] and developing multi-modal attention for claim verification [16].

Given the promising developments in hybrid neural architectures for fact verification, this research aims to systematically evaluate and compare four distinct hybrid approaches that combine bidirectional LSTM with different complementary components: CNN, RNN, GRU, and GNN. The study seeks to identify the most effective architectural combinations for automated fact verification under computational constraints, while providing insights into training dynamics, generalization capabilities, and the underlying factors that contribute to successful claim-evidence verification performance.

### Task Solution

**FEVER Dataset.** The Fact Extraction and VERification (FEVER) dataset [1] provides a comprehensive benchmark for automated fact-checking, containing human-generated claims paired with Wikipedia evidence. Claims are annotated with three labels: SUPPORTS, REFUTES, or NOT ENOUGH INFO. Our preprocessing combines claims and evidence using '[SEP]' separator, creating unified sequences processed by Keras Tokenizer with 8,000-word vocabulary and 100-token maximum length. Training data is stratified-sampled to 40,000 examples for 4GB GPU constraints, with balanced class weighting addressing label imbalance. Research indicates that 31.75% of claims require multiple evidence sentences, while 16.82% need multi-sentence composition and 12.15% require cross-document evidence [1]. This complexity necessitates sophisticated reasoning architectures capable of handling multi-hop inference and cross-document relationships.

**BiLSTM-CNN Architecture.** This hybrid design integrates bidirectional sequential processing with multi-scale convolutional feature extraction, inspired by successful CNN-LSTM combinations in fake news detection [5, 6]. The architecture begins with 128-dimensional embeddings, followed by bidirectional LSTM (64×2 units) with dropout regularization (0.2). Three parallel 1D convolutional branches (kernel sizes 3, 4, 5, each 64 filters) extract unigram, bigram, and trigram patterns essential for factual inconsistency detection. Features are concatenated and processed

through global max pooling before classification via dense layers (128→64→3 units).

**BiLSTM-RNN Architecture.** A dual-recurrent design combining bidirectional LSTM with SimpleRNN for computational efficiency. Following identical embedding and BiLSTM processing, a SimpleRNN layer (64 units) provides additional sequential modeling with reduced overhead. Batch normalization layers stabilize training between recurrent components. This streamlined approach offers faster computation while maintaining temporal dependency modeling, following principles from ensemble neural networks.

**BiLSTM-GRU Architecture.** This architecture leverages complementary strengths of bidirectional LSTM and GRU for optimized sequence processing. The GRU component (64 units) employs simplified gating mechanisms combining forget and input gates, reducing parameters while maintaining gradient flow. The reset and update gates enable selective information retention, addressing vanishing gradients in deep recurrent networks.

**BiLSTM-GNN Architecture.** A novel graph-inspired approach treating sequences as graphs where words represent nodes, motivated by recent advances in graph attention networks [10,11]. Following BiLSTM processing, node feature transformation (1D conv, 64 filters, kernel=1) creates graph abstractions. Three parallel aggregation operations (kernels 1, 3, 5, each 32 filters) simulate GNN message-passing at multiple scales, inspired by evidence-aware graph networks [12, 13]. Concatenated features undergo global max pooling for graph-level representation, enabling complex relational reasoning for claim-evidence verification.

### Results Analysis

**Performance Overview.** The BiLSTM-CNN architecture achieved optimal performance with 79.5% accuracy, 79.5% recall, 77.9% F1-score, and 93.4% AUC-ROC. BiLSTM-GNN demonstrated competitive results (78.9% accuracy, 93.3% AUC-ROC), while BiLSTM-GRU achieved respectable performance (77.9% accuracy, 92.2% AUC-ROC). BiLSTM-RNN exhibited catastrophic failure (33.3% accuracy), performing at random chance levels. These results align with findings from hybrid neural approaches [7], which demonstrate that combining multiple neural paradigms can achieve superior performance compared to single-architecture models. However, our results also confirm that not all hybrid combinations are beneficial, as evidenced by the BiLSTM-RNN failure.

**Training Dynamics.** BiLSTM-CNN showed smooth convergence with training accuracy improving from 85% to 95% while validation remained stable around 80%. BiLSTM-GNN exhibited similar robust optimization. BiLSTM-GRU displayed initial instability with dramatic accuracy jumps around epoch 2, suggesting initialization sensitivity. BiLSTM-RNN's flat curves confirmed complete optimization failure.

**Architectural Insights.** CNN's superior performance validates multi-kernel convolution's importance for local pattern recognition in fact verification, consistent with hybrid CNN-LSTM approaches [5, 6]. The competitive GNN performance demonstrates graph-inspired

neighborhood aggregation's potential for textual reasoning, aligning with recent graph-based fact verification systems [12, 13] (Fig. 1). GRU's reasonable results confirm sophisticated gating benefits, though combination with bidirectional LSTM introduces optimization complexity.

**Overfitting Evidence.** All successful architectures exhibit substantial train-validation gaps (15-17%): BiLSTM-CNN (95% vs 80%), BiLSTM-GRU (93% vs 78%), BiLSTM-GNN (96% vs 80%). This consistent disparity indicates systematic overfitting across architectures, a common challenge in fact verification systems with limited training data [3, 4] (Fig. 2).

**Root Causes are:**

1) **Dataset Limitations.** The 40,000-sample constraint severely limits pattern diversity for complex architectures with 650K-850K parameters. Models memorize specific claim-evidence combinations rather than learning generalizable verification reasoning, similar to challenges identified in CNN-RNN hybrid approaches [7].

2) **Model Complexity.** High parameter-to-sample ratios enable perfect training data fitting while failing validation generalization. Current regularization (dropout 0.2-0.5, batch normalization) proves insufficient for model complexity.

## Conclusions

The consistent 15-17% overfitting gap suggests fact verification under hardware constraints requires fundamentally different approaches: few-shot learning methods, meta-learning for rapid adaptation, or knowledge-augmented models reducing training data dependence. Recent hybrid approaches [7] achieve superior performance through architectural diversity, suggesting future work should prioritize ensemble strategies.

The superior CNN performance validates local pattern recognition importance, while competitive GNN results demonstrate graph-inspired reasoning potential, consistent with recent evidence-aware approaches [12, 13]. Future research should bridge the performance gap through ensemble methods [8,9] and advanced hybrid architectures while exploring graph-based reasoning capabilities for automated fact-checking systems.

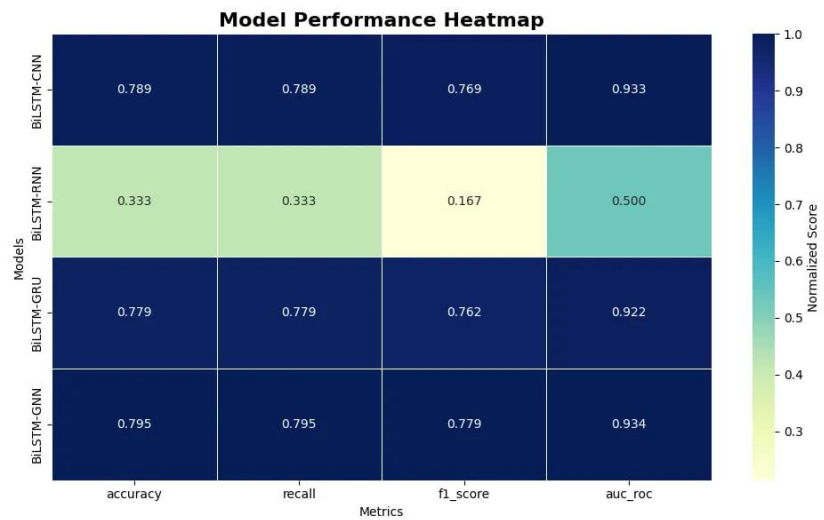


Fig. 1. Performance heatmap of all models

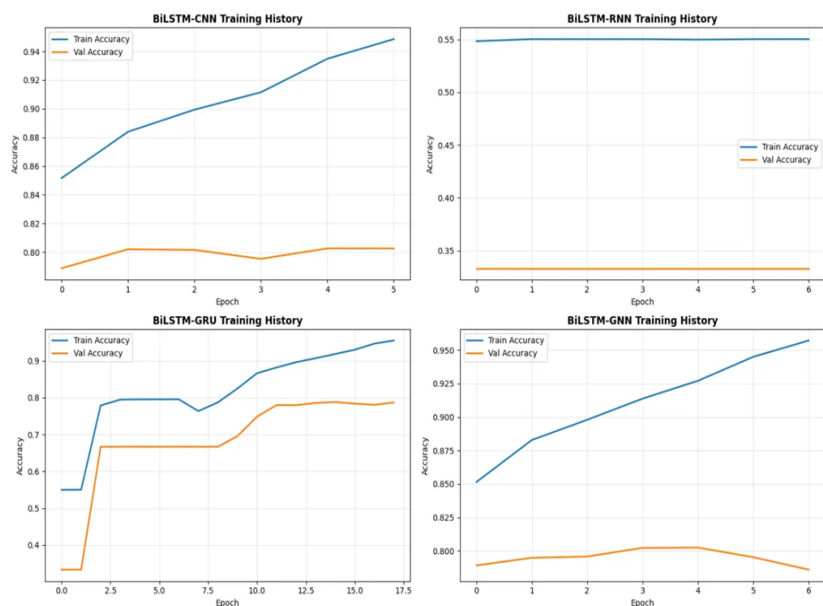


Fig. 2. Training graphs of all models

Several advanced approaches can be implemented for future work. **Ensemble Methods:** Implement ensemble learning approaches [8, 9] combining predictions from multiple architectures. Voting mechanisms, stacking, or bagging could leverage the complementary strengths of different neural paradigms while reducing variance. **Enhanced Graph Modeling:** Extend GNN approaches with explicit graph construction incorporating named entity relationships, following evidence-aware graph networks [12, 13]. **Multi-modal graph attention** [16] could integrate diverse evidence types.

**Hybrid Architecture Optimization:** Explore alternative hybrid combinations inspired by successful CNN-LSTM models [5,6], potentially investigating CNN-GRU or GNN-CNN combinations for improved performance.

## REFERENCES

1. Thorne, J.; Vlachos, A.; Christodoulopoulos, C.; Mittal, A. FEVER: a Large-scale Dataset for Fact Extraction and VERification. In Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational

- Linguistics: Human Language Technologies, New Orleans, Louisiana, June 2018; pp. 809–819. doi: <https://doi.org/10.18653/v1/N18-1074>.
- Nie, Y.; Chen, H.; Bansal, M. Combining Fact Extraction and Verification with Neural Semantic Matching Networks. In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, July 2019; pp. 6859–6866. doi: <https://doi.org/10.1609/aaai.v33i01.33016859>.
  - Abualigah, L.; Al-Ajlouni, Y.Y.; Daoud, M.S.; Altalhi, M.; Migdady, H. Fake news detection using recurrent neural network based on bidirectional LSTM and GloVe. Soc. Netw. Anal. Min. 2024, 14, 40. doi: <https://doi.org/10.1007/s13278-024-01198-w>.
  - Sastrawan, I.K.; Bayupati, I.P.A.; Arsa, D.M.S. Detection of fake news using deep learning CNN–RNN based methods. ICT Express 2021, 8, 396–408. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ict.2021.10.003>.
  - Dev, D. G.; Bhatnagar, V.; Bhati, B. S.; Gupta, M.; Nanthamornphong, A. LSTMCNN: A hybrid machine learning model to unmask fake news. Heliyon. 2024, 3, 10. doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25244>.
  - Ajik, E. D.; Obuandike, G. N.; Echobu, F. O. Fake News Detection Using Optimized CNN and LSTM Techniques. Journal of Information Systems and Informatics. 2023, 3, 5, 1044–1057. doi: <https://doi.org/10.51519/journalisi.v5i3.548>.
  - Nasir, J. A.; Khan, O. S.; Varlamis, I. Fake news detection: A hybrid CNN-RNN based deep learning approach. International Journal of Information Management Data Insights. 2021, 1, 1, 100007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmei.2020.100007>.
  - Almandouh, E.; Alrahmawy, M.F.; Eisa, M. et al. Ensemble based high performance deep learning models for fake news detection. Sci. Rep. 2024, 14, 26591. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76286-0>.
  - Mohammed, A.; Kora R. A comprehensive review on ensemble deep learning: Opportunities and challenges. J. King Saud Univ.-Comput. Inf. Sci. 2023, 2, 35, 757–774. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.01.014>.
  - Veličković, P.; Cucurull, G.; Casanova, A.; Romero, A.; Liò, P.; Bengio, Y. Graph Attention Networks. In Proceedings of the International Conference on Learning Representations, 2018; pp. 1–12. url: <https://arxiv.org/abs/1710.10903v3>.
  - Brody, S.; Alon, U.; Yahav, E. How Attentive are Graph Attention Networks? In Proceedings of the International Conference on Learning Representations, May 2021. url: <https://arxiv.org/abs/2105.14491>.
  - Wu, L.; Rao, Y.; Yang, X.; Wang, W.; Nazir, A. Evidence-Aware Hierarchical Interactive Attention Networks for Explainable Claim Verification. In Proceedings of the Twenty-Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence, July 2020; pp. 1388–1394. doi: <https://doi.org/10.24963/ijcai.2020/193>.
  - Xu, W.; Wu, J.; Liu, Q.; Wu, S.; Wang, L. Evidence-aware Fake News Detection with Graph Neural Networks. In Proceedings of the ACM Web Conference 2022, April 2022; pp. 2501–2510. doi: <https://doi.org/10.1145/3485447.3512122>.
  - Sun, C.; Li, C.; Lin, X. et al. Attention-based Graph Neural Networks: A Survey. Artif. Intell. Rev. 2023, 56, 2263–2310. doi: <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10577-2>.
  - Wu, Z.; Pan, S.; Chen, F.; Long, G.; Zhang, C.; Yu, P.S. A Comprehensive Survey on Graph Neural Networks. IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst. 2021, 32, 4–24. doi: <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.2978386>.
  - Luu, S. T.; Vo, T.; Nguyen, L.M. MCVE: Multimodal Claim Verification and Explanation Framework for Fact-Checking System. Multimed. Syst. 2025, 31, 242. doi: <https://doi.org/10.1007/s00530-025-01804-7>.

Received (Надійшла) 15.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.08.2025

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Даценко Сергій Сергійович** – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

**Serhii Datsenko** – PhD student, Department Computer Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [sergdacenko@gmail.com](mailto:sergdacenko@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-9514-0433>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57218596147&origin=resultlist>.

#### Порівняння нейронних архітектур для перевірки фактів на наборі даних FEVER

С. С. Даценко

**Анотація.** Експоненціальне зростання дезінформації та фейкових новин на цифрових платформах ставить безпрецедентні виклики перед цілісністю інформації, що вимагає створення складних автоматизованих систем перевірки фактів, здатних з високою точністю та обчислювальною ефективністю перевіряти твердження на основі надійних джерел доказів. Це дослідження має на меті оцінити та порівняти чотири гібридні нейронні архітектури (BiLSTM-CNN, BiLSTM-RNN, BiLSTM-GRU та BiLSTM-GNN) для автоматизованої перевірки фактів за допомогою набору даних FEVER, досліджуючи їх ефективність у перевірці тверджень та доказів в умовах обмеженої пам'яті GPU, одночасно аналізуючи динаміку навчання та можливості узагальнення. Отримано наступні результати: архітектура BiLSTM-CNN досягла оптимальної продуктивності з точністю 79,5%, відтворюваністю 79,5%, 77,9% F1-показником та 93,4% AUC-ROC, за нею йдуть BiLSTM-GNN (78,9% точність, 93,3% AUC-ROC) та BiLSTM-GRU (77,9% точність, 92,2% AUC-ROC), тоді як BiLSTM-RNN продемонструвала катастрофічну невдачу (33,3% точність). Усі успішні архітектури продемонстрували значне перенавчання з розривом у точності тренування-валідації 15-17%, що вказує на системні проблеми узагальнення з обмеженими даними для навчання (40 000 зразків). **Висновок.** Витяг багатоядерних конволюційних ознак виявляється найефективнішим для розпізнавання локальних візерунків у перевірці фактів, тоді як підходи, натхненні графами, демонструють багатообіцяючий потенціал для реляційного міркування. Постійне перенавчання в різних архітектурах підкреслює гостру необхідність вдосконалення методів регуляризації, збільшення обсягу даних та ансамблевих методів для досягнення надійної роботи автоматизованих систем перевірки фактів в умовах обчислювальних обмежень.

**Ключові слова:** перевірка фактів, нейронні мережі, набір даних FEVER, гібридні архітектури, графічні нейронні мережі, двонаправлений LSTM.

Т. М. Деркач<sup>1</sup>, М. С. Бойко<sup>2</sup>, В. С. Ястреба<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

<sup>2</sup> Digicode.IT компанія, Полтава, Україна

## РОЛЬ ДИСЦИПЛІНИ «ВВЕДЕННЯ В СПЕЦІАЛЬНІСТЬ» У ФОРМУВАННІ ПРОФЕСІЙНОЇ ІДЕНТИЧНОСТІ СТУДЕНТІВ ГАЛУЗІ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Анотація.** У статті розкрито значення навчальної дисципліни «Введення в спеціальність» у процесі формування професійної ідентичності студентів, які здобувають освіту за галуззю знань F «Інформаційні технології». З огляду на динамічний розвиток цифрових технологій, зростання ролі IT-галузі у глобальній економіці та високий рівень конкуренції на ринку праці, особливого значення набуває не лише професійна підготовка, а й формування внутрішньої мотивації, ціннісного ставлення до обраної професії, професійного самовизначення та рефлексії студентів. Проведено аналіз концептуальних підходів до визначення поняття «професійна ідентичність», розкрито її структуру та чинники формування у молоді, що обирає сферу інформаційних технологій. Зазначається, що професійна ідентичність охоплює не лише знання і вміння, а й внутрішнє прийняття себе як представника IT-спільноти, готовність до професійної взаємодії, прийняття етичних норм, самостійність у прийнятті рішень, а також бачення особистого розвитку у контексті технологічного прогресу. Окрему увагу приділено змісту й структурі дисципліни «Введення в спеціальність», яка, з одного боку, виконує ознайомчу та адаптаційну функцію, а з іншого – спрямована на розвиток первинної професійної мотивації, розуміння студентами змісту своєї майбутньої діяльності, стандартів професії, вимог роботодавців, перспектив працевлаштування, а також на розвиток soft skills, критичного мислення та відповідального ставлення до навчання. У межах дисципліни студенти знайомляться з історією розвитку IT-галузі, еволюцією спеціальностей, основними напрямками та трендами сучасних інформаційних технологій, прикладами застосування IT у різних сферах життя. Визначено, що використання активних методів навчання (тренінги, проектна діяльність, ділові ігри, аналіз кейсів), залучення до викладання фахівців-практиків з IT-компаній, впровадження елементів наставництва, індивідуалізація освітньої траєкторії сприяють активному формуванню професійної ідентичності ще на початковому етапі навчання. Висвітлено також значення академічної доброчесності, цифрової культури та медіа-грамотності як складових професійної ідентичності сучасного IT-фахівця. У статті наведено результати анкетування студентів першого курсу, що засвідчують позитивний вплив дисципліни на самоусвідомлення ролі майбутнього фахівця, зростання мотивації до навчання, формування уявлення про професійні компетентності, які потрібно розвивати. Підсумовуючи, автор наголошує на необхідності методичного оновлення змісту дисципліни відповідно до змін у професійному середовищі, впровадження міждисциплінарного підходу, партнерства з IT-компаніями та розвитку індивідуальних освітніх траєкторій. Ключовим висновком є те, що дисципліна «Введення в спеціальність» є не лише важливим елементом навчального плану, а й стратегічним інструментом формування професійної ідентичності, що сприяє особистісному й професійному становленню майбутніх фахівців у сфері інформаційних технологій.

**Ключові слова:** професійна ідентичність, інформаційні технології, адаптація студентів, академічна доброчесність, освітня траєкторія, введення в спеціальність.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Одним із викликів сучасної вищої освіти є формування готовності здобувачів до професійної самореалізації в умовах динамічного розвитку технологій. Особливо це відчутно у сфері IT, бо сучасний ринок праці у сфері інформаційних технологій висуває високі вимоги до молодих фахівців як у технічному, так і в особистісному аспектах. Саме тому важливо з перших днів навчання створити основу для успішної професійної самореалізації студентів. Дисципліні «Введення в спеціальність» відведена важлива роль у формуванні професійної ідентичності студентів. Як відомо, професійна ідентичність – це усвідомлення особистістю своєї належності до певної професії, прийняття її цінностей, норм і стилю мислення. Для студентів IT-спеціальностей це поняття має особливе значення, оскільки IT – це не просто галузь знань, а цілий світогляд, що формується на перетині технологій, інновацій і соціальних змін. Дисципліна «Введення в спеціальність» виконує функцію орієнту, що допомагає першокурсникам усвідомити

структуру обраної спеціальності, її актуальність, перспективи, а також сформувати стійку мотивацію до навчання. У сфері інформаційних технологій темпи змін потребують постійного оновлення знань, високого рівня цифрової культури, гнучкості та самостійності. Початковий етап навчання набуває особливої актуальності, зокрема дисципліна «Введення в спеціальність», яка забезпечує цілісне уявлення про обрану професію та освітню траєкторію.

**Мета і завдання дослідження.** Мета статті – визначити роль дисципліни у формуванні професійної ідентичності студентів IT-спеціальностей та обґрунтувати доцільність її інтеграції в систему забезпечення якості вищої освіти.

Основні завдання:

- формування загального уявлення про галузь IT;
- ознайомлення з профілем освітньої програми та ключовими компетентностями;
- розвиток навичок командної роботи, самопрезентації, критичного мислення;
- адаптація до вимог вищої освіти;
- мотивація до академічної доброчесності та самостійного навчання.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Поняття професійної ідентичності охоплює усвідомлення студентом свого майбутнього професійного «Я», прийняття цінностей обраної сфери діяльності, а також мотиваційно-сміслового ставлення до фаху. Згідно з дослідженнями українських науковців (В.В. Рибалко, Л.М. Карамушка, І. В. Снігур), раннє формування ідентичності позитивно корелює з академічною успішністю та готовністю до кар'єрного зростання.

Зокрема, праці Л. М. Карамушки створюють цілісну методологічну основу для формування професійної ідентичності в ІТ-студентів, особливо через призму організаційної культури, адаптаційної психології та поведінкової готовності. В.В. Рибалка у своїх дослідженнях вводить поняття «професійного самовизначення», яке має особливе місце в студентські роки. А також звертає увагу на роль освітнього середовища, зокрема адаптивності навчального процесу до потреб майбутнього фахівця. Слід відмітити також і зарубіжні підходи (Gee J.P., Trede F., Macklin R., Wenger E.), де аналізують роль практичного досвіду у формуванні професійної ідентичності.

### Виклад основного матеріалу

Курс «Введення в спеціальність» є міждисциплінарним за своєю природою й охоплює наступні змістові блоки:

1. Галузевий контекст ІТ: ознайомлення з ключовими етапами розвитку інформаційних технологій, сучасний стан та тенденції розвитку інформаційних технологій в Україні та світі, роллю ІТ у глобальній економіці, сучасними викликами.

2. Професійна орієнтація: аналіз ІТ-спеціальностей, знайомство з профілями спеціальностей (F3, F5, F7, тощо). Зустрічі з практиками, ознайомлення з ІТ-компаніями.

3. Академічна культура та доброчесність: основи наукового письма, академічного цитування, антиплагіатні системи, правила ведення документації та технічної звітності.

4. Soft skills для ІТ-фахівця: розвиток критичного мислення, ефективної комунікації, тайм-менеджменту, роботи в команді.

5. Освітня траєкторія: ознайомлення з навчальним планом, етапами проходження практики, можливостями дуальної освіти та сертифікацій.

6. Самоосвіта та кар'єрне планування: Можливості підвищення кваліфікації: сертифікаційні курси, участь у хакатонах, менторських програмах.

Ефективна реалізація змісту дисципліни «Введення в спеціальність» для студентів ІТ-галузі базується на використанні сучасного методичного забезпечення та різноманітних форм організації освітнього процесу, орієнтованих на розвиток самостійності, професійної мотивації та цифрової культури.

Методичне забезпечення дисципліни «Введення в спеціальність» є критично важливим фактором якості підготовки студентів ІТ-напрямів, оскільки саме цей курс виконує адаптаційну, орієнтовану й мотиваційну функції.

Методичне наповнення курсу має наступні складові:

робоча програма дисципліни, яка визначає мету, структуру, обсяг, компетентності;

методичні рекомендації до занять, які містять зміст тем, питання для самостійного опрацювання, практичні завдання;

тести й контрольні питання у форматі Google Forms або Moodle Quiz сприяють самоконтролю та діагностиці знань;

ресурси дистанційної підтримки курсу: LMS Moodle або Microsoft Teams, із інтеграцією сторонніх сервісів (GitHub, Canva, Miro, Trello) організують взаємодію, зберігають матеріали, полегшують зворотний зв'язок.

Особливу увагу приділено адаптації до цифрового середовища навчання, використанню відкритих онлайн-курсів та вправ із цифрової безпеки та академічної доброчесності (PlagScan, Unicheck).

Наявність якісного, актуального та структурованого методичного супроводу дозволяє:

1. Забезпечити єдність цілей і засобів навчання.

Навчально-методичні матеріали (робоча програма, описи тем) задають вектор дисципліни: від знайомства з професією – до побудови особистої освітньої траєкторії в ІТ. Чітко сформульовані цілі й очікувані результати дозволяють викладачу і студенту діяти узгоджено, орієнтуючись на набуття ключових компетентностей.

2. Сприяти мотивації та професійному самовизначенню.

Методичні матеріали повинні включати приклади успішних кар'єрних шляхів, інтерв'ю з ІТ-практиками, профорієнтаційні завдання (SWOT-аналіз себе, тестування типу мислення). Це дозволяє студенту побачити реальні перспективи, відчути належність до галузі та активізувати внутрішню мотивацію до навчання.

3. Систематизувати навчальний процес.

Завдяки інструкціям до практичних і самостійних завдань, методичне забезпечення забезпечує структурованість, послідовність та прозорість оцінювання. Це особливо важливо для першокурсників, які тільки входять у систему вищої освіти.

4. Розвивати soft skills через практичні кейси.

Методичні рекомендації мають включати завдання, які формують навички презентації, командної роботи, публічного виступу. Наприклад: захист міні-проектів, проведення навчальних дебатів, написання ІТ-резюме.

5. Підтримувати академічну доброчесність.

Методичні документи повинні містити правила оформлення робіт, приклади цитування, інформацію про антиплагіатні сервіси. Формування етичного ставлення до праці є основою професійної відповідальності ІТ-фахівця.

Під час викладання дисципліни важливим фактором є форми організації навчання. У рамках дисципліни застосовуються інтерактивні та проектно орієнтовані форми роботи:

– інтерактивні лекції з використанням ментальних карт, онлайн-опитувань;

– практичні заняття у форматі майстер-класів, тренінгів, ділових ігор, спрямованих на розвиток soft skills: командної роботи, критичного мислення, емоційного інтелекту;

– гостьові лекції представників ІТ-компаній Полтави та регіону, включаючи серії «Інтерв'ю з практиком»;

– індивідуальні освітньо-професійні проекти: створення міні-портфоліо, плану кар'єри, аналіз ринку вакансій у ІТ;

– групові обговорення та круглі столи щодо етичних викликів ІТ-галузі (конфіденційність даних, ШІ, авторське право);

– тьюторський супровід студентів першого семестру (індивідуальні консультації, менторські зустрічі).

Такі підходи забезпечують суб'єктну позицію здобувача освіти, активізують мотивацію до навчання та сприяють формуванню стійкого інтересу до професійної діяльності в ІТ-сфері.

Доцільно використовувати активні методи навчання: кейс-методи, проектну діяльність, освітні портфоліо, менторство, запрошення фахівців галузі. Завершальним етапом доцільно вважати захист індивідуального плану розвитку студента.

### Практична значущість дисципліни

Дисципліна «Введення в спеціальність» відіграє важливу роль у забезпеченні якісної адаптації студентів до освітнього процесу та формуванні усвідомленого ставлення до майбутньої професії. Її значущість особливо помітна в контексті підготовки фахівців з інформаційних технологій, де поєднуються високі вимоги до технічної компетентності з потребою у розвитку гнучких навичок (soft skills) та цифрової культури. Згідно з даними моніторингових досліджень, проведених у Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» протягом 2021–2024 років, викладання дисципліни «Введення в спеціальність» для студентів ІТ спеціальностей дозволило досягти низки конкретних практичних результатів:

- Підвищення рівня академічної успішності: середній бал за підсумками зимової та літньої сесій зріс на 5-6 балів відповідно (за 100-бальною шкалою), що свідчить про позитивну динаміку адаптації студентів до академічних вимог (рис. 1).

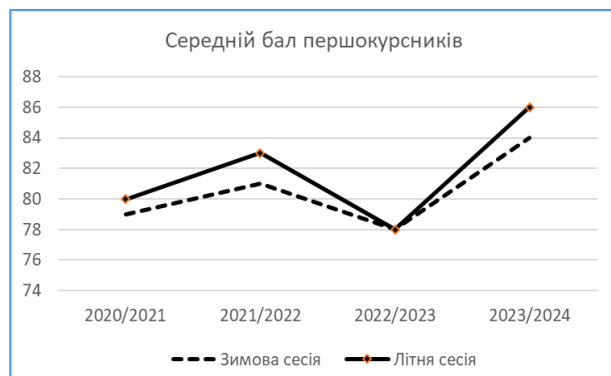


Рис. 1. Динаміка середнього балу

- Покращення академічної успішності з року в рік: зростає кількість студентів з високим та достатнім рівнем.

Спостерігається зменшення частки студентів з незадовільними результатами – з 12% у 2020/2021 н.р. до 5% у 2023/2024 н.р. (рис. 2)

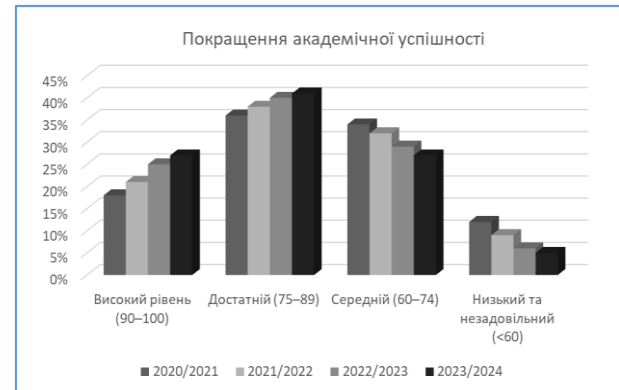


Рис. 2. Динаміка академічної успішності

- Стійке зростання позитивного сприйняття курсу. У 2024 році понад 80% студентів вважають курс важливим для формування професійної мотивації (рис. 3).



Рис. 3. Аналіз опитування студентів щодо викладання дисципліни

Окрім кількісних показників, у рамках дисципліни активно застосовувалися методи формульованого оцінювання та проектного підходу.

Студенти створювали особисті освітньо-професійні портфоліо, брали участь у профорієнтаційних заходах, зустрічах із представниками ІТ-компаній України (зокрема, SoftServe, Nix Solutions, Grid Dynamics, QATestLab, Eram, CHI Software, а також з Харківським ІТ кластером), проходили тестування з визначення домінуючих професійних інтересів та презентували індивідуальні освітні траєкторії.

Практичний ефект дисципліни полягає також у формуванні таких ключових навичок:

- комунікативна компетентність (через підготовку презентацій, участь у групових обговореннях, публічний захист мініпроектів);

– навички самоорганізації та тайм-менеджменту (через дотримання дедлайнів та розробку особистого графіку навчання);

– цифрова грамотність (завдяки роботі з LMS Moodle, Google Workspace, GitHub тощо).

Таким чином, практична значущість дисципліни «Введення в спеціальність» у Полтавській політехніці була підтверджена як на емпіричному рівні, так і через позитивні відгуки здобувачів освіти та викладачів. Її подальший розвиток, зокрема в напрямку дуальної освіти та тьюторського супроводу, може стати ефективним інструментом підвищення якості підготовки ІТ-фахівців у вітчизняній вищій школі.

Слід зазначити, що дисципліна «Введення в спеціальність» виконує важливу роль не лише як елемент формального навчального плану, але і як інструмент практичної соціалізації студента у новому для нього освітньому та професійному середовищі. Її впровадження дозволяє вирішити низку практичних завдань, що мають безпосередній вплив на якість підготовки майбутніх фахівців галузі інформаційних технологій.

Передусім, курс сприяє зниженню рівня дезадаптації першокурсників, що виявляється у труднощах з орієнтацією в новому середовищі, непорозуміннях щодо академічних вимог, проблемах з тайм-менеджментом тощо. Адаптація студентів є критичним чинником їх подальшого академічного успіху, а також зменшення показників відрахування.

По-друге, дисципліна має кар'єрну орієнтованість: студенти отримують базові уявлення про сучасний ринок праці, знайомляться з реальними професійними траєкторіями у сфері ІТ, дізнаються про вимоги до фахівців, проходять профорієнтаційне тестування. Такі елементи формують навички стратегічного планування кар'єри ще на ранньому етапі навчання. Створення індивідуального освітньо-кар'єрного плану дозволяє чітко розуміти зв'язок між навчальними дисциплінами та професійними компетентностями.

Крім того, курс дозволяє формувати первинний досвід командної роботи та взаємодії у цифровому середовищі, з яким пов'язане подальше професійне життя ІТ-фахівця. Виконання групових проєктів, презентацій, створення особистих портфоліо або резюме в електронному форматі – це завдання, які одночасно активізують пізнавальну діяльність і

наближають до реальних умов професійної діяльності.

Важливою практичною складовою є також формування навичок самостійної та відповідальної роботи, що включає академічну доброчесність, дотримання дедлайнів, використання ліцензійного програмного забезпечення, навички критичного аналізу джерел інформації. Вивчення таких аспектів дозволяє уникнути академічних порушень (плагиату, списування), що є поширеною проблемою серед першокурсників.

Курс також забезпечує первинний розвиток soft skills, що визнаються ключовими у сучасному ІТ-середовищі: комунікація, креативність, адаптивність, аналітичне мислення. У поєднанні з формуванням елементів digital literacy (цифрової грамотності) це створює основу для успішної участі у подальших освітніх та професійних ініціативах: стажуваннях, хакатонах, проєктній діяльності.

Отже, практична значущість дисципліни «Введення в спеціальність» полягає у створенні стартових умов для цілісного професійного та особистісного розвитку студента, формуванні позитивної мотивації до навчання, орієнтації у змісті освітньої програми та підвищенні загальної якості освітнього процесу в галузі інформаційних технологій.

## Висновки

Професійна ідентичність студента ІТ-спеціальності – це складний і тривалий процес, який починається ще з першого курсу. Саме курс «Введення в спеціальність» відіграє ключову роль у запуску цього процесу, формуючи у студентів не лише знання про галузь, а й мотивацію, професійне мислення та налаштованість на постійний розвиток. Дисципліна «Введення в спеціальність» має значний потенціал у підвищенні якості підготовки ІТ-фахівців і є необхідним елементом підготовки студентів ІТ-напряму. Її інтеграція сприяє гармонійному входженню до професійного середовища, формуванню академічної культури, плануванню індивідуальної освітньої траєкторії. Дисципліна «Введення в спеціальність» відіграє ключову роль у становленні студента як майбутнього ІТ-фахівця. Вона не лише формує фундаментальні знання про галузь, але й закладає основи академічної культури, професійної відповідальності та прагнення до постійного розвитку.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gee J. P. Identity as an analytical lens for research in education / J. P. Gee // *Review of Research in Education*. – 2000. – Vol. 25. – P. 99–125. DOI: 10.2307/1167322.
2. Markham A. N. Fieldwork in social media: What would Malinowski do? / A. N. Markham // *Qualitative Communication Research*. – 2013. – Vol. 2, no. 4. – P. 434–446. DOI:10.1525/qs.2013.2.4.434
3. Trede F. Professional identity development: A review of the higher education literature / F. Trede, R. Macklin, D. Bridges // *Studies in Higher Education*. – 2012. – Vol. 37, no. 3. – P. 365–384. DOI:10.1080/03075079.2010. 521237.
4. Wenger E. *Communities of Practice: Learning, Meaning, and Identity* / E. Wenger. – Cambridge : Cambridge University Press, 1998. – 336 p. DOI:10.1017/CBO9780511803932
5. Зелінська О.В., Потапова Н.А., Волонтир Л.О. Інформаційні системи та технології в галузі. Навчальний посібник. / О.В. Зелінська, Н.А. Потапова, Л.О. Волонтир, - Вінниця: ВНАУ, 2020. – 263 с
6. Інформаційні технології в системі вищої освіти: перспективи розвитку : матеріали наук.-практ. конф. (Київ, 27 березня 2022 р.) / М-во освіти і науки України, КНЕУ. – Київ: КНЕУ, 2022. – 136 с.

7. –Карамушка Л. М. Професійна ідентичність молоді в умовах соціальних змін / Л. М. Карамушка // Психологія і суспільство. – 2016. – № 2. – С. 42–50. DOI: 10.26565/2227-6505-2016-2-05
8. Карпенко О. І. Формування професійної ідентичності студентів вищих навчальних закладів / О. І. Карпенко // Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Психологічні науки. – 2018. – № 1. – С. 27–31. DOI: 10.32999/ksu2312-3206/2018-1-5
9. Кузьміна І. П. Інструментальний компонент професійної ідентичності майбутніх фахівців-математиків / І. П. Кузьміна // Новітня освіта: зб.наук.праць. – Київ, 2014. – Випуск 1. – С. 35-41.
10. Рибалка В. В. Психологія особистості: навч. посіб. / В. В. Рибалка. — Харків: Прапор, 2005. – 528 с.
11. Савченко І. І. Професійна ідентичність особистості: сучасний стан і перспективи дослідження / І. І. Савченко // Науковий часопис НПУ ім. М. П. Драгоманова. Серія 12. Психологічні науки. – 2017. – Вип. 60. – С. 123–128.
12. Снігур І. В. Формування професійної ідентичності студентів технічних спеціальностей / І. В. Снігур // Освіта та розвиток обдарованої особистості. – 2020. – № 6(81). – С. 38–41. DOI: 10.32405/2309-3935-2020-6(81)-38-41
13. Шульга І. В. Формування професійної ідентичності майбутніх фахівців ІТ у процесі фахової підготовки: дис. ... канд. психол. наук: 19.00.07 / І. В. Шульга; НПУ ім. М. П. Драгоманова. – Київ, 2021. – 215 с.

Received (Надійшла) 29.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.08.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Деркач Тетяна Миколаївна** – доктор філософії, доцент, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем, Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка", Полтава, Україна;

**Tetyana Derkach** – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer and Information Technologies and Systems, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine;

e-mail: [tanider@ukr.net](mailto:tanider@ukr.net); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-8062-9105>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57204846765>.

**Бойко Марія Сергіївна** – менеджер з доставки, Digicode.IT компанія, Полтава, Україна;

**Maria Boyko** – Delivery Manager, Digicode.IT company, Poltava, Ukraine;

e-mail: [zelenskayam@gmail.com](mailto:zelenskayam@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-8556-8911>.

**Ястреба Владислав Сергійович** – аспірант кафедри автоматизації, електроніки та телекомунікацій, Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка", Полтава, Україна;

**Vladislav Yastreba** – postgraduate student of the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine;

e-mail: [vlad.yastreba22@gmail.com](mailto:vlad.yastreba22@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0007-1750-9419>.

**The role of the course "Introduction to the specialty"  
in shaping the professional identity of information technology students**

Tetyana Derkach, Maria Boyko, Vladislav Yastreba

**Abstract.** The article explores the significance of the academic course *"Introduction to the Specialty"* in shaping the professional identity of students pursuing education in the field of knowledge F "Information Technology." Given the dynamic development of digital technologies, the growing role of the IT sector in the global economy, and the high level of competition in the labor market, not only professional training but also the formation of internal motivation, value-based attitudes toward the chosen profession, professional self-determination, and student reflection becomes increasingly important. The article analyzes conceptual approaches to defining the notion of *"professional identity"* in psychology and pedagogy, revealing its structure and the factors influencing its development among young people choosing the IT sphere. It emphasizes that professional identity encompasses not only knowledge and skills but also internal acceptance of oneself as a member of the IT community, readiness for professional interaction, adherence to ethical standards, independent decision-making, and personal development within the context of technological progress. Special attention is given to the content and structure of the course *"Introduction to the Specialty,"* which, on one hand, serves an introductory and adaptive function, and on the other—aims to foster initial professional motivation, students' understanding of their future professional activity, industry standards, employer expectations, employment prospects, and the development of soft skills, critical thinking, and a responsible attitude toward learning. Within the course, students become familiar with the history of IT development, the evolution of specialties, key directions and trends in modern information technologies, and examples of IT applications across various life spheres. It is established that the use of active learning methods (training sessions, project activities, business games, case analysis), the involvement of industry professionals from IT companies in teaching, the implementation of mentoring elements, and the individualization of educational paths actively promote the formation of professional identity even at the early stages of study. The article also highlights the importance of academic integrity, digital culture, and media literacy as integral components of the professional identity of modern IT specialists. The article presents the results of a first-year student survey, confirming the course's positive impact on self-awareness of the future specialist role, increased motivation for learning, and the formation of an understanding of the professional competencies that need to be developed. In conclusion, the author emphasizes the need for methodological updates to the course content in line with changes in the professional environment, the implementation of an interdisciplinary approach, partnerships with IT companies, and the development of individual educational trajectories. The key conclusion is that the *"Introduction to the Specialty"* course is not only an important part of the curriculum but also a strategic tool for forming professional identity, supporting both the personal and professional development of future IT professionals.

**Keywords:** professional identity, information technology, student adaptation, academic integrity, educational trajectory, introduction to the specialty.

Dmytro Diachenko, Matvii Korobeinikov, Oleksandr Korobeinikov, Andriy Kovalenko, Pavlo Kravchenko  
Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

## DATA PROCESSING METHODS IN A CORPORATE NETWORK

**Abstract. Relevance.** In the context of modern digital business transformation, corporate networks have become critically important components of enterprise information infrastructure, integrating numerous systems, devices, and services into a unified information environment. Every day, vast volumes of data are generated, transmitted, stored, and processed within these networks, encompassing all aspects of organizational activity – from financial operations and logistics to customer communications and internal management processes. The successful functioning of a corporate network is impossible without effective data processing, which enables the extraction of valuable insights from raw data, supports strategic decision-making, ensures information security, and optimizes resources. Amid intense competition, the rapid growth of information flows, and increasing demands for swift decision-making, data processing methods play a crucial role in enabling the analytical capabilities of enterprises. Data processing methods in corporate environments find applications across diverse business sectors. In the financial domain, they are used for transaction analysis, risk management, market fluctuation forecasting, and fraud detection. In logistics, they support route optimization, warehouse stock control, and real-time supply coordination. In marketing, they facilitate customer behavior analysis, audience segmentation, and personalized communication. In HR departments, they assist in employee performance evaluation and candidate selection. In healthcare, they support patient data analysis, service process optimization, and clinical decision-making. Furthermore, data processing forms the foundation for the development of artificial intelligence systems, digital twins, cybersecurity solutions, and automated enterprise management. Traditional approaches to data processing are gradually being replaced by advanced technologies based on Big Data, real-time stream processing, cloud computing, intelligent data analytics, and machine learning. In this context, issues related to data protection, integrity, availability, and compliance with legal and regulatory requirements for confidentiality gain particular importance. **The purpose** is to analyze modern methods and technologies for data processing in corporate networks, identify their advantages, disadvantages, and application areas, and classify approaches to data collection, cleansing, storage, and analysis. **The object** of research is enterprise corporate networks. **The subject** of research includes methods and technologies for data processing, storage, analysis, and protection. **The results.** As a result of the conducted research, a comprehensive understanding of modern data processing methods in corporate environments was formed. The architectural models of enterprise information systems were analyzed, key stages of data preparation identified, and approaches to their processing – from classical to intelligent – were characterized. The review revealed a wide range of data processing techniques, from traditional SQL queries and multidimensional analysis to real-time processing and machine learning applications. The choice of a particular approach depends on data volume, data inflow speed, latency sensitivity, and the specific goals of processing.

**Keywords:** corporate network, data processing, architecture, transaction, cybersecurity, Big Data.

### Introduction

The successful operation of modern enterprises largely depends on the efficiency of processing large volumes of information circulating within corporate networks. This involves the collection, systematization, storage, analysis, and transmission of data between various company departments, as well as external counterparties. The complexity of information processing increases with the growing volume of data, the need to ensure prompt access to information, and the tightening requirements for data security and protection. Within a corporate network, data processing encompasses the entire information lifecycle – from its creation or external acquisition to its storage, analysis, and subsequent use in decision-making processes.

To fully understand the essence of data processing in this context, it is essential to have a clear understanding of what constitutes a corporate network and the types of data that circulate within it.

A corporate network represents an integrated environment that unites computer systems, servers, storage facilities, network equipment, software, and users into a single information space. Such a network enables uninterrupted communication among all structural units of an organization, regardless of their physical location, allowing for centralized data management, information

exchange, and access to resource management, reporting, and customer support systems.

The data circulating in a corporate environment may vary in format and degree of structure. Structured data includes information arrays with a clearly defined format, such as numerical tables or records in relational databases. Unstructured data, in contrast, lacks a fixed format and may include emails, text documents, audio and video files, images, or social media messages. A separate category is semi-structured data, which contains a certain degree of organization but does not conform to traditional relational database formats.

In this context, data processing entails not only the technical computation of data but also includes stages such as data collection, filtering, aggregation, transformation, analysis, and subsequent presentation in an interpretable format. A key feature of corporate data processing is the necessity to account for complex access hierarchies, user roles, security levels, and adherence to data storage and processing policies in accordance with regulatory requirements.

A defining aspect is that corporate data does not exist in isolation. It is closely integrated into an organization's business processes, forming the context in which it gains significance. This underpins the need for a comprehensive infrastructure capable of handling data processing in alignment with the company's scale,

structure, and operational dynamics. Thus, understanding the fundamental concepts related to the nature of corporate networks and the types of data processed within them is critical for the effective implementation of modern data processing methods in the context of high-intensity digital transactions and analytical demands.

All these factors create the necessity for a systematic study of processes associated with data handling within corporate networks. Given the growing demands for the speed, reliability, and scalability of information solutions, it is essential to examine not only the general principles of such systems' operation but also the specific methods employed to ensure a complete data cycle – from acquisition to analytical reporting. In this context, the analysis of contemporary approaches to data transformation, selection of processing algorithms, automation tools, and visualization instruments becomes particularly relevant, as they enable not only data storage but also the extraction of practical value for managerial decision-making.

**The purpose** is to analyze modern methods and technologies for data processing in corporate networks, identify their advantages, disadvantages, and application areas, and classify approaches to data collection, cleansing, storage, and analysis.

### **Main part**

The architecture of a corporate data processing system represents a comprehensive, multi-layered structure that ensures interaction between technical, software, and organizational components for the effective management of information flows within an enterprise. Under modern conditions, such an architecture must not only be capable of processing large volumes of data but also of promptly responding to changing business requirements, ensuring scalability, fault tolerance, and uninterrupted access to critical services.

A central element of any corporate architecture is the logic governing the distribution of data and computing resources, which may follow either a centralized or a distributed model. In centralized models, core processing and storage are performed on a single server or within a corporate data center, enabling efficient control over data access, updates, and backup operations. In contrast, distributed systems delegate processing and storage tasks to multiple network nodes, which helps reduce latency, increase flexibility, and bring data closer to end users – particularly in geographically dispersed branches of an enterprise.

The emergence of cloud technologies has led to significant changes in architectural approaches. The virtualization of computing resources, the use of infrastructure as a service and platform as a service [1], have enabled companies to dynamically scale computing power, deploy new services without significant investment in hardware, and integrate with external service providers. In such an environment, data can be stored in cloud repositories, processed through virtual clusters, and analytics can be accessed via web interfaces from anywhere in the world.

Despite these advantages, such solutions require special attention to issues of security, access control, data

leakage prevention, and compliance with international standards for the storage of personal and commercial data.

The architecture of data processing also includes modules responsible for integration with data sources – these may include corporate accounting systems, CRM systems, sensors, web services, or partner company databases. At the next level are processing services, which implement the logic of transformation, aggregation, filtering, and verification of information using both traditional software tools and specialized frameworks such as Apache Spark [2]. A critical part of the architecture is the result presentation interface, which allows users to interact with processed data through visualization dashboards, reports, or API interfaces for further use in business applications.

An effective architecture for corporate data processing must take into account the specifics of the industry, the scale of the company, the types of data being processed, and the organization's level of digital maturity. Only a flexible, scalable, and secure architecture can enable full automation of analytical processes, reduce infrastructure costs, and significantly improve the quality of managerial decisions based on up-to-date data.

In the context of corporate networks, data processing is impossible without a high-quality and systematic approach to data collection and preparation. This stage determines not only the volume and relevance of available information but also its cleanliness, completeness, and suitability for further analytical processing. In many cases, it is at the collection and preprocessing stages where data suffers the most significant quality losses, which may subsequently lead to erroneous conclusions or ineffective management decisions. Therefore, the question of corporate data collection and preparation methods is of critical importance.

Data in corporate environments can come from a variety of sources, each with its own structure, formatting standards, and update frequency.

The main sources include internal enterprise information systems – particularly enterprise resource planning systems [3], accounting and logistics platforms – as well as external web services, API platforms, user behavior monitoring tools, the Internet of Things, and partner databases. Given the high heterogeneity of these sources, the data collection process relies on specialized integration tools that ensure the unification of incoming information and its delivery to a single processing environment.

One of the key methodological approaches to data collection and preparation is the ETL process, which consists of three logically connected stages [4]. The first stage involves extracting data from sources, where it is crucial to ensure data flow continuity, avoid record duplication, and maintain version control. In the transformation stage, data undergoes various operations such as filtering, format standardization, anomaly removal, deduplication, handling of missing values, categorization, or merging of records from multiple tables. The final stage is loading the cleansed and

transformed information into target systems, which may include data warehouses, analytical databases, cloud platforms, or local enterprise servers.

Particular attention should be given to the data cleansing phase, as real-world information obtained from corporate sources is often incomplete, noisy, or contains logical inconsistencies. The preparation process uses methods such as automated validation, verification rules based on domain constraints, and algorithmic tools for detecting outliers, atypical values, or logical inconsistencies within records. In many cases, normalization is also applied to bring the data to a common scale for further statistical or machine learning processing.

Modern data integration and preparation platforms allow automation of key steps in the process, reduce human involvement in routine procedures, and ensure quality control at every stage of processing. Their use is especially justified in environments with high demands for speed, process repeatability, and infrastructure scalability.

Thus, the quality and relevance of the information received by a business largely depend on how well the processes of data collection and preparation are organized. Only with reliable integration of sources, flexible data transformation, and continuous quality monitoring is it possible to build an information environment that supports effective analytics, forecasting, and strategic decision-making based on accurate and timely data.

Data processing in a corporate environment is a complex and multifaceted process that involves transforming incoming information into a form with practical value for decision-making, process optimization, and the generation of analytical reports. Depending on the objectives, data volumes, technical capabilities, and time available for analysis, companies may apply a variety of processing methods – ranging from classical statistical techniques to high-performance systems incorporating elements of artificial intelligence.

In traditional corporate systems, data processing is typically based on the use of relational databases and SQL queries.

This approach enables aggregation, sorting, filtering, and selection of data based on various criteria, which is sufficient for most basic reporting tasks. Additionally, OLAP analytics tools are widely used, providing multidimensional data analysis in cube format, allowing managers and analysts to quickly gain insights into key performance indicators [5]. In cases where large volumes of data need to be processed or complex scenarios constructed, these methods are complemented by batch processing tools that run on schedules or are triggered under specific conditions.

However, in today's digital landscape, the demand for real-time data processing is rapidly increasing. Unlike the traditional model – where data is accumulated and analyzed with a time lag – stream processing has gained popularity, enabling immediate handling of events and transactions as they occur. Such systems are critical for the financial sector, telecommunications, e-commerce, and cybersecurity, where even a few seconds' delay can

have significant consequences. Tools such as Apache Kafka, Apache Flink, and Spark Streaming enable the efficient implementation of such approaches, allowing for high-speed processing of large volumes of streaming data.

With the development of big data technologies, companies are increasingly turning to methods based on Hadoop architecture or distributed computing frameworks. These approaches make it possible to work with information that cannot be processed using traditional tools due to its volume, velocity, or variety. Big Data processing entails not only the technical capability to handle massive datasets but also the adoption of new approaches to storage, indexing, parallel processing, and workload distribution across clusters.

Methods of intelligent data analysis are gaining increasing importance. These include machine learning, classification, clustering, forecasting model development, recommendation systems, and machine learning algorithms [6]. Such approaches make it possible not only to analyze existing data but also to identify hidden patterns, forecast future events, and make adaptive decisions under conditions of uncertainty. Models can be trained on historical data and updated automatically as new input parameters are introduced, making them especially useful in areas such as marketing, service personalization, logistics optimization, and risk management.

It is important to note that effective data processing is impossible without visualization and presentation in a form understandable to end users. Visualization methods – including interactive dashboards, charts, maps, and heatmap analysis – represent the final stage of processing, transforming computation results into visual formats that support decision-making. This enables management to quickly interpret outcomes, respond to changes in business dynamics, and detect critical points in real time.

In corporate networks, where data volume, speed, and criticality are constantly growing, data security becomes not only a technical concern but also a strategic one. Data processing involves continuous movement, transformation, storage, and access to information, which creates potential vulnerabilities at every stage. Malicious actors may exploit these vulnerabilities to gain unauthorized access, steal confidential information, or manipulate data – leading not only to financial losses but also to serious reputational damage for the organization. Therefore, ensuring data security during processing is an essential requirement for the sustainable functioning of any corporate information system.

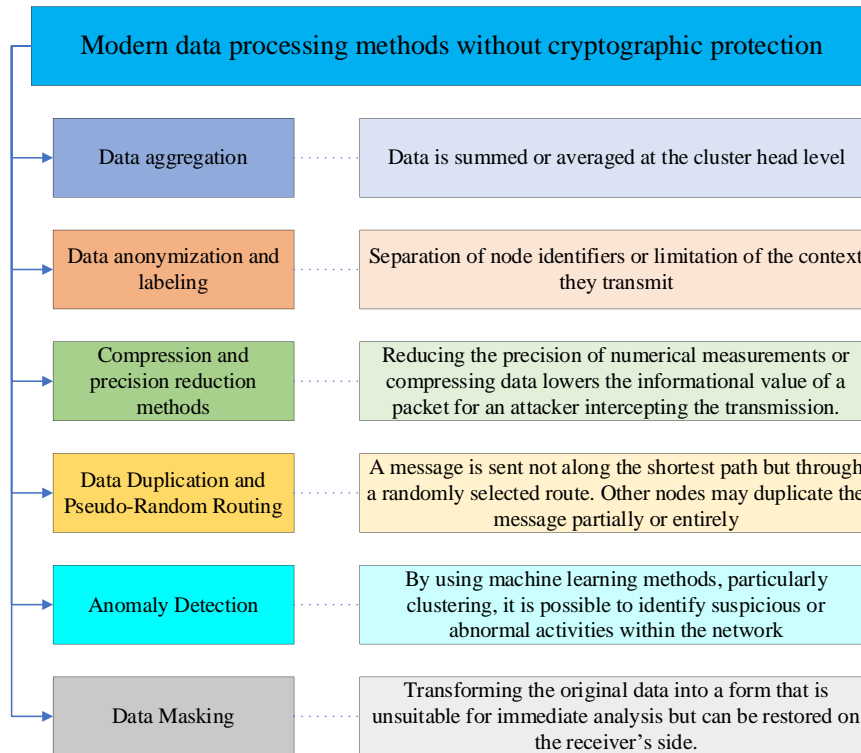
Data protection begins with the establishment of a robust user identification and authentication system, ensuring that only authorized individuals have access to resources. In corporate systems, this is often implemented through multi-level verification mechanisms, including one-time passwords, hardware tokens, biometric identifiers, or integration with centralized access control systems.

However, even after identity confirmation, it is critical to enforce privilege limitations through authorization policies, granting each user access only to

the specific data necessary for their job responsibilities.

Modern data processing cannot be imagined without cryptographic protection tools. Encrypting data during transmission between network nodes as well as during storage in databases helps minimize the risk of interception or disclosure. Contemporary symmetric and asymmetric encryption algorithms, SSL/TLS protocols,

digital signatures, and data integrity checks provide the foundation for secure communication in digital environments [7]. This becomes especially important when processing is performed in cloud environments or when data is transferred across organizational structures. However, there are other methods for sensor networks that do not involve cryptographic protection (Fig. 1).



**Fig 1.** Data processing methods in sensor networks without cryptographic protection

In addition to technical measures, data protection requires continuous monitoring of user activity, detection of anomalous behavior, and logging of access to sensitive information. Information security management systems, intrusion detection modules, auditing tools, and automated event analysis systems not only detect violations but also enable timely responses to potential threats. This is especially critical in large organizations, where thousands of users operate simultaneously, making manual oversight of individual actions unfeasible.

Another essential aspect is data backup and recovery in the event of incidents. Building a comprehensive backup system, implementing geographic redundancy of storage, and enabling automatic service recovery after failures ensure resilience against catastrophic events such as technical breakdowns, software errors, or targeted attacks. It is important not only to create backup copies but also to regularly test recovery procedures to confirm their effectiveness under real conditions.

Effective data processing in a corporate environment is impossible without the use of specialized tools and platforms that support the execution of complex computational operations, integration with information sources, data storage, transformation, analysis, and visualization in a user-friendly format. The diversity of business tasks, data volumes, infrastructure constraints,

and security requirements necessitates the widespread use of both traditional software and cloud services, as well as open-source solutions focused on flexibility, scalability, and high performance. Large enterprises working with data in various formats and from numerous sources often rely on distributed frameworks for parallel information processing. One of the most well-known solutions is the Apache Hadoop ecosystem, which enables the storage and processing of terabytes of data through a model of distributed storage and parallel computing. In combination with Hadoop, Apache Hive is frequently used, allowing SQL-like queries on large datasets while maintaining the convenience of classical analytics in Big Data environments. A more powerful and flexible tool is Apache Spark – a platform optimized for high-speed processing of both streaming and batch data, which is particularly well-suited for implementing machine learning algorithms, graph processing, and embedded analytical models [2].

In cases where organizations focus on integration, automation, and visual monitoring of data preparation processes, tools such as Talend, Apache NiFi, and Microsoft SQL Server Integration Services have gained considerable popularity. These platforms allow the creation of data pipelines that include extraction, transformation, validation, and loading of information into target repositories. Thanks to user-friendly graphical

interfaces and the ability to monitor the status of each processing stage, these platforms significantly lower the technical barrier for specialists, while providing high flexibility and control over data quality.

With the proliferation of cloud technologies, more and more companies are transitioning to cloud platforms for data processing, which offer computing resources as a service without requiring investment in proprietary infrastructure. Among the most widely used platforms are Amazon Web Services, Google Cloud Platform, and Microsoft Azure [8]. These platforms enable the creation of scalable processing environments, the implementation of powerful analytical scenarios, the use of artificial intelligence services, and the provision of continuous data availability from any location worldwide. A distinctive feature of such services is the ability to integrate with numerous data sources, utilize prebuilt analytics models, and ensure high levels of security through multi-layered access architecture, encryption, and monitoring.

In addition to computing platforms, a critical component of modern data processing is data visualization tools. Power BI, Tableau, Qlik Sense, and Looker are examples of systems that allow users without deep technical expertise to build interactive dashboards, charts, diagrams, and reports based on up-to-date data from various sources. These systems are widely used across all management levels – from operational analysis of departmental performance to the formulation of strategic indicators for top management. A special niche is occupied by corporate systems that combine data processing functionality with business process management features. Examples of such solutions include platforms like SAP, Oracle BI, and IBM Cognos Analytics. These systems not only provide full-featured data handling but also integrate with management modules, financial subsystems, logistics, and human resources – creating a unified information space for all organizational units.

Thus, data processing in corporate networks is highly relevant and increasingly adopted by companies as a foundation for their effective functioning.

### Conclusions

In the course of studying data processing methods within corporate networks, a comprehensive environment was examined in which modern companies operate as digital systems, constantly exchanging large volumes of information. A modern corporate network is not merely a

set of interconnected devices, but a dynamic infrastructure that generates, transmits, and processes data that holds strategic significance for decision-making. Understanding data types, the nature of information flows, and the context of their use served as a starting point for a systematic analysis of data processing. The analysis of corporate data processing architectures revealed that the organization of computing resources and the method of integrating data sources directly influence the performance of analytical processes, system resilience under load, scalability, and operational continuity. Modern business conditions require the integration of local computing centers with cloud-based solutions, along with a high degree of flexibility to adapt the infrastructure to a rapidly changing market.

Special attention was paid to data collection and preparation methods, as this stage establishes the quality of all subsequent processing. Through the use of ETL processes, automation of transformations, cleansing, and validation of incoming information, companies build a reliable foundation for accurate analytical modeling. The integrity of this foundation directly affects the precision of conclusions derived from the analysis.

The review of data processing methods revealed a wide range of approaches: from classical SQL queries and multidimensional analysis to real-time processing and the application of machine learning. The choice of a particular method is determined by data volume, input velocity, latency sensitivity, and the overall processing goal – whether it be the generation of standard reports or the construction of complex predictive models.

The issue of data security extended beyond the technical realm and encompassed legal, organizational, and ethical dimensions. During processing, it is necessary not only to ensure encryption and authentication but also to comply with international standards and legal requirements for personal data protection. It is this reliability of protection that builds trust between users and the systems processing their data.

Thus, corporate data processing is not merely a technical activity but a comprehensive strategic system that integrates infrastructural, analytical, organizational, and security components. Its effective operation enables the transformation of raw data streams into concrete business value, improves the quality of managerial decision-making, and creates a sustainable competitive advantage in the context of the digital economy.

### REFERENCES

1. Michael J. Kavis. *Architecting the Cloud: Design Decisions for Cloud Computing Service Models (SaaS, PaaS, and IaaS)*. 1st ed, Wiley, 2014. 224 p.
2. Jean-Georges Perrin. *Spark in Action*. 2nd ed, Manning, 2020. 576 p.
3. Jack G Nestell, David L Olson Professor. *Successful ERP Systems: A Guide for Businesses and Executives*. Business Expert Press, 2017. 134 p.
4. Brij Kishore Pandey, Emily Ro Schoof. *Building ETL Pipelines with Python: Create and deploy enterprise-ready ETL pipelines by employing modern methods*. 1st ed, Packt Publishing, 2023. 246 p.
5. Edward Pollack. *Analytics Optimization with Columnstore Indexes in Microsoft SQL Server: Optimizing OLAP Workloads*. 1st ed, Apress, 2022. 300 p.
6. Flach P. A. *Machine Learning: The Art and Science of Algorithms that Makes Sense of Data*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 291 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511973000>
7. Rolf Oppliger. *Ssl and Tls: Theory and Practice*. 3rd ed, Artech House, 2023. 388 p.
8. Dr. Logan Song. *The Self-Taught Cloud Computing Engineer: A comprehensive professional study guide to AWS, Azure, and GCP*. 1st ed., Packt Publishing, 2023. 472 p.

Received (Надійшла) 02.06.2025  
Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.08.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Дяченко Дмитро Олександрович** – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Dmytro Diachenko** – PhD student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [dmytro.diachenko2@nure.ua](mailto:dmytro.diachenko2@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0006-5751-3511>.

**Коробейніков Матвій Борисович** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Matvii Korobeynikov** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [matvii.korobeynikov@nure.ua](mailto:matvii.korobeynikov@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0007-7237-2590>.

**Коробейніков Олександр Борисович** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Oleksandr Korobeynikov** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [oleksandr.korobeynikov@nure.ua](mailto:oleksandr.korobeynikov@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0009-9981-9860>.

**Коваленко Андрій Анатолійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Andriy Kovalenko** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [andriy.kovalenko@nure.ua](mailto:andriy.kovalenko@nure.ua); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2817-9036>;

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56423229200>.

**Кравченко Павло Олександрович** – кандидат технічних наук, асистент кафедри ЕОМ, Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Pavlo Kravchenko** – PhD, Assistant Lecturer of the Department of electronic computers, Kharkiv National University of radio electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [pavlo.kravchenko@nure.ua](mailto:pavlo.kravchenko@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-0456-3295>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216151371>.

**Методи обробки даних в корпоративній мережі**

Д. О. Дяченко, М. Б. Коробейніков, О. Б. Коробейніков, А. А. Коваленко, П. О. Кравченко

**Анотація. Актуальність.** У сучасних умовах цифрової трансформації бізнесу, корпоративні мережі стали критично важливими елементами інформаційної інфраструктури підприємств, які об'єднують численні системи, пристрої та сервіси в єдиний інформаційний простір. Щодня в таких мережах генерується, передається, зберігається і опрацьовується величезний обсяг даних, що охоплює всі аспекти діяльності організації – від фінансових операцій і логістики до комунікацій з клієнтами та внутрішніх процесів управління. Успішне функціонування корпоративної мережі неможливе без ефективної обробки даних, яка дозволяє отримувати з сирової інформації цінні знання, приймати стратегічні рішення, забезпечувати безпеку інформації та оптимізувати ресурси. В умовах високої конкуренції, стрімкого зростання кількості інформаційних потоків і зростаючих вимог до оперативності прийняття рішень, саме методи обробки даних відіграють ключову роль у забезпеченні аналітичної спроможності підприємств. Методи обробки даних у корпоративному середовищі знаходять застосування в найрізноманітніших сферах бізнесу. У фінансовому секторі вони використовуються для аналізу транзакцій, управління ризиками, прогнозування коливань ринку та виявлення шахрайства. У сфері логістики – для оптимізації маршрутів, контролю складських запасів і координації поставчань у режимі реального часу. У маркетингу – для вивчення поведінки клієнтів, сегментації аудиторії та персоналізації комунікацій. У HR-відділах – для оцінки продуктивності персоналу та підбору кандидатів. У сфері охорони здоров'я – для аналізу медичних даних пацієнтів, оптимізації процесів надання послуг та підтримки клінічних рішень. Крім того, обробка даних є основою для розвитку систем штучного інтелекту, цифрових двійників, кібербезпеки та автоматизованого управління підприємствами. Традиційні підходи до обробки даних поступово поступаються місцем сучасним технологіям, що базуються на використанні Big Data, обробці потокової інформації в реальному часі, хмарних обчисленнях, інтелектуальному аналізі даних та машинному навчанні. При цьому особливої уваги набувають питання захисту даних, їхньої цілісності, доступності, а також дотримання нормативно-правових вимог щодо конфіденційності. **Метою даної роботи** є аналіз сучасних методів і технологій обробки даних у корпоративних мережах, їх переваг, недоліків та сфер застосування, класифікація підходів до збору, очищення, зберігання й аналізу інформації. **Об'єктом дослідження** є корпоративні мережі підприємств. **Предметом дослідження** є методи та технології обробки, зберігання, аналізу та захисту даних. **Результати.** У результаті проведеного дослідження було сформовано цілісне уявлення про сучасні методи обробки даних у корпоративному середовищі. Проаналізовано архітектурні моделі інформаційних систем підприємств, виявлено ключові етапи підготовки даних, охарактеризовано підходи до їхньої обробки – від класичних до інтелектуальних. Розгляд методів обробки даних виявив широкий спектр підходів: від класичних SQL-запитів і багатовимірного аналізу до обробки в реальному часі та застосування машинного навчання. Вибір конкретного підходу визначається обсягом даних, швидкістю їх надходження, критичністю до затримок, а також метою обробки.

**Ключові слова:** корпоративна мережа, обробка даних, архітектура, транзакція кібербезпека, Big Data.

В. В. Заїка, О. В. Чуєв, О. І. Морозова, Т. С. Нікітіна

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ВЕБСИСТЕМИ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ОБРОБКИ ТА МОНІТОРИНГУ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ

**Анотація.** **Актуальність.** У сучасних умовах різкого зростання обсягів цифрових даних та ускладнення мережевої інфраструктури зростає потреба в інтелектуальних рішеннях для обробки та моніторингу інформаційних потоків. Традиційні засоби стають недостатньо ефективними для забезпечення швидкого реагування на інциденти та витягнення значущої інформації з неструктурованих джерел. **Об'єкт дослідження:** інтелектуальні вебсистеми для автоматизації обробки текстових даних і моніторингу серверної інфраструктури. **Мета статті:** аналіз сучасних підходів до побудови інтелектуальних вебсистем, що поєднують технології розпізнавання тексту та автоматичного моніторингу інфраструктури, а також розробка концептуальної моделі їх інтеграції. **Результати дослідження.** У статті представлено теоретичні основи інтелектуальних вебсистем, проаналізовано сучасні методи розпізнавання тексту на основі глибинного навчання, а також засоби моніторингу інфраструктури, зокрема системи збору метрик, логів і виявлення аномалій. Запропоновано концептуальну модель інтеграції таких компонентів у єдину вебсистему. **Висновки.** Інтелектуальні вебсистеми демонструють високий потенціал для автоматизації ключових процесів аналізу даних та контролю ІТ-інфраструктури. Їх впровадження сприяє підвищенню ефективності, швидкості реагування та зниженню ризиків, пов'язаних з обробкою великих обсягів інформації. **Сфера використання отриманих результатів:** вебзастосунки для обробки документів, платформи моніторингу серверів і хмарних сервісів, системи підтримки прийняття рішень у бізнесі та кібербезпеці.

**Ключові слова:** інтелектуальні вебсистеми, автоматизація, оптичне розпізнавання символів (OCR), моніторинг інфраструктури, машинне навчання, обробка природної мови (NLP), SIEM, Semantic Web.

### Вступ

У сучасному цифровому середовищі інформаційні потоки та обсяги даних постійно збільшуються, що створює необхідність автоматизованої обробки для оперативного отримання знань та прийняття ефективних рішень. Інтелектуальні вебсистеми поєднують традиційну вебархітектуру з передовими методами штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН), що дозволяє здійснювати більш гнучкий аналіз даних і забезпечувати адаптивну взаємодію з користувачами. Завдяки цим технологіям як приватні особи, так і організації можуть швидше знаходити необхідну інформацію, оптимізувати свої процеси та приймати раціональні рішення.

Концепція Web Intelligence передбачає трансформацію Інтернету у «Мережу мудрості» (The Wisdom Web), де розумні алгоритми аналізують потоки даних з різних джерел, включаючи соціальні мережі [1]. Це відкриває можливість створення самонавчальних систем, здатних генерувати персоналізовані рекомендації та прогнозувати події на основі аналізу великих масивів інформації, але також потребує відповідної системи, що забезпечить швидку, якісну і стійку роботу таких процесів. Значний розвиток отримали технології автоматизації обробки текстової інформації, зокрема оптичне розпізнавання символів (OCR) і обробка природної мови (NLP). Ці методи дають змогу перетворювати неструктуровані тексти у формат, доступний для машинного аналізу. Попит на OCR нового покоління, що використовує технології нейронних мереж, демонструє стрімке зростання, і очікується, що його розвиток продовжиться протягом наступних десятиліть [2]. Одночасно, прогрес у сфері NLP сприяв появі генеративного ШІ, що охоплює здатність великих мовних моделей (LLM) вести діалог та моделей генерації зображень – інтерпретувати запити користувачів [3]. Це

свідчить про актуальність цих технологій у глобальному інформаційному просторі.

Важливим аспектом є моніторинг серверної інфраструктури, який забезпечує стабільність роботи вебдодатків завдяки оперативному виявленню відмов та аномалій. Надійний моніторинг критично важливий, оскільки затримки у роботі додатків або зниження якості обслуговування можуть призвести до відтоку користувачів, фінансових втрат та погіршення репутації компанії [4]. Таким чином, інтеграція передових методів текстової аналітики, прогнозування подій та моніторингу інфраструктури створює комплексний підхід до управління інформаційними потоками.

**Метою даної статті** є систематизація сучасних методів та підходів у сфері інтелектуальних вебсистем, аналіз алгоритмів розпізнавання тексту та моніторингу серверів, а також представлення концептуальної моделі їх інтеграції. У дослідженні розглядаються ключові аспекти, включаючи теоретичні основи інтелектуальних вебтехнологій, огляд методів автоматизованої обробки інформації, аналіз проблем та обмежень, що постають перед цими технологіями, формування висновків та визначення перспектив подальших наукових розробок.

### Теоретичні основи інтелектуальних вебсистем

Інтелектуальна вебсистема – це сучасний вебдодаток або комплекс сервісів, який інтегрує передові методи штучного інтелекту (ШІ), включаючи експертні системи, нейронні мережі, машинне навчання та онтології, для автоматичної обробки, аналізу та інтерпретації великих обсягів даних [5]. Такі системи створюють умови для швидкої та ефективної взаємодії користувачів з інформацією, дозволяючи отримувати релевантні результати та підтримувати прийняття обґрунтованих рішень.

Основними компонентами інтелектуальної веб-системи є модулі збору та фільтрації даних, які забезпечують накопичення інформації з різних джерел, включаючи бази знань, сенсорні пристрої, соціальні мережі та вебресурси [6]. Крім того, аналітичні алгоритми, що включають методи прогнозування, сегментації та розпізнавання шаблонів, дозволяють здійснювати поглиблений аналіз отриманих даних. Важливу роль відіграють інтерфейси взаємодії з користувачем, які забезпечують зручний доступ до обробленої інформації, адаптивний контент та персоналізовані рекомендації. Ключовими особливостями інтелектуальних веб-систем є здатність до навчання на основі отриманих даних, що дозволяє удосконалювати алгоритми обробки та підвищувати точність прогнозів [6]. Важливою характеристикою також є самоадаптація – можливість змінювати моделі аналізу відповідно до зміни умов або нових викликів. Крім того, такі системи здатні працювати з неоднорідними джерелами інформації, включаючи структуровані та неструктуровані дані, що забезпечує їхню універсальність і гнучкість.

З погляду архітектури, інтелектуальні веб-системи зазвичай реалізуються за принципом розподілених або хмарних сервісів, що забезпечує їхню масштабованість, гнучкість та надійність. Найчастіше використовується мікросервісна або сервіс-орієнтована архітектура (SOA), яка дозволяє ефективну взаємодію між компонентами за допомогою стандартних протоколів REST/HTTP. Для зберігання великих обсягів даних використовуються різні типи баз:

- SQL-базы – для структурованих даних;
- NoSQL-базы – для гнучкого управління нереляційними та великими масивами даних;
- графові бази даних – для роботи з онтологіями та знаннями.

Обробка потокових даних здійснюється за допомогою таких технологій, як Kafka, Flink, Spark Streaming, а для аналізу неструктурованої інформації застосовуються платформи Big Data, включаючи Hadoop та Elasticsearch. Інформаційний потік у таких системах може включати текстову інформацію, таку як документи, новини або аналітичні звіти, та телеметричні дані, як метрики серверної інфраструктури чи логи роботи додатків.

Принципово важливим є поділ потоків даних на семантичний рівень (аналіз змісту) та технічний рівень (моніторинг серверної інфраструктури). Семантична складова потребує застосування методів NLP, таких як морфологічний аналіз, тематичне моделювання та розпізнавання сутностей. Технології Semantic Web, такі як RDF, OWL та SPARQL, та графи знань (knowledge graph) допомагають формалізувати знання, що дозволяє системі не лише аналізувати дані, а й генерувати рекомендації або автоматизовані висновки. Однією з ключових переваг інтелектуальних веб-систем є їхня адаптивність та здатність до самонавчання. Це досягається завдяки використанню сучасних моделей машинного навчання, зокрема:

- нейронних мереж – для розпізнавання складних закономірностей;
- методів ансамблів – для підвищення точності прогнозів;

- методу опорних векторів (SVM) – для класифікації та моделювання даних.

Системи інтелектуального моніторингу інфраструктури часто застосовують аналітику потокових метрик, що дозволяє заздалегідь виявляти аномалії та прогнозувати навантаження на сервери [7]. Використання “мікросервісної” моделі гарантує високу гнучкість: кожен окремий сервіс, наприклад, OCR-аналізатор, система зберігання метрик або модуль семантичного аналізу, може розвиватися незалежно.

Підсумовуючи, інтелектуальні веб-системи поєднують класичні принципи веброботи (клієнт-серверна архітектура, API, протоколи) з сучасними методами обробки даних та алгоритмами ШІ. Це створює універсальну платформу, здатну аналізувати великі масиви неоднорідної інформації в реальному часі, ефективно прогнозувати зміни в цифровому середовищі та автоматично адаптуватися до нових умов.

### Огляд сучасних підходів до розпізнавання тексту

Розпізнавання тексту охоплює як обробку документів (сканованих зображень з друкованим чи рукописним текстом), так і виявлення текстових фрагментів на зображеннях (наприклад, вуличні знаки). Традиційні методи OCR спираються на попередню обробку зображень (бінаризація, шумозаглушення, вичленення контурів символів), після чого застосовують шаблонне чи контурне розпізнавання. Раніше широко використовувалися евристичні алгоритми та статистичні моделі, наприклад методи на основі прихованих марковських моделей (HMM) для моделювання послідовностей символів [8]. Однак такі підходи часто потребували ручної адаптації під специфічні шрифти чи структури документів.

Серйозний прорив у розпізнаванні тексту принесли методи глибокого навчання. Згорткові нейронні мережі (CNN) ефективні у витяганні ознак із зображень тексту, а рекурентні мережі (RNN, LSTM) враховують послідовний характер символів. Згортково-рекурентні моделі, так звані CRNN, комбінують ці підходи для побудови end-to-end системи розпізнавання [9]. Варто зауважити, що сучасні системи розпізнавання зазвичай доповнюють мовними моделями чи словниками для корекції помилок і підвищення точності. Також активно розвивається оптичне розпізнавання рукописного тексту (HTR). Міжнародні дослідження вказують, що основною складністю HTR є велика варіабельність почерку (різні стилі, розмір букв, похил тощо). Саме тому сучасні HTR-системи базуються на поєднанні CNN та RNN, часто з попереднім навчанням на великих корпусах рукописів, а потім донавчанням для конкретних мов або наборів символів.

У 2023–2024 роках з'явилися системи на основі архітектури Transformer, які змінили підходи до розпізнавання тексту. Наприклад, модель TrOCR використовує трансформерні мережі як для обробки зображення документа, так і для генерації тексту, демонструючи вищу точність порівняно з попередніми CNN–RNN підходами. Відзначається, що “існуючі підходи для розпізнавання зазвичай базуються на CNN для розуміння зображень і RNN для генерації тексту”, тоді як нові

рішення з тренуваними трансформерними моделями перевершують попередні результати як для друкованого, так і для рукописного тексту [10]. Варто відзначити, що за такі якісні результати роботи доводиться розплачуватися високою обчислювальною складністю та потребою у великих моделях та GPU.

Ще однією ключовою віхою стала поява мовної моделі BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers), запропонованої дослідниками Google [11]. Хоча BERT першочергово призначена для обробки тексту, її принципи трансформерної архітектури лягли в основу більшості сучасних моделей, зокрема і в OCR-системах. BERT дозволяє враховувати контекст слова з обох боків речення (ліворуч і праворуч), що забезпечує значно глибше розуміння семантики порівняно з попередніми підходами. У суміжних задачах, як-от доопрацювання розпізнаного тексту, класифікація документів або витяг інформації, інтеграція BERT-моделей показує значне покращення якості результатів. Крім того, ідеї, закладені в BERT, використовуються в мультимодальних рішеннях, які об'єднують зображення і текст для комплексної інтерпретації даних. Таким чином, сучасні підходи до OCR можна згрупувати так:

- класичні алгоритми (фільтрація, сегментація, шаблонне розпізнавання, НММ) для чітко структурованих документів;
- методи нейронних мереж (CNN, RNN/LSTM, CRNN) з попередньою обробкою зображень для різноякісних документів і форм;
- трансформери і великі мовні моделі (напр., TrOCR, BERT) для автоматичного виділення ознак і прогнозування символів на рівні слова або рядка;
- комерційні та open-source системи (Tesseract з LSTM-модулями, ABBYY FineReader, Google Cloud Vision, Microsoft Cognitive Services), які реалізують багато з перерахованих методів у готових API та інструментах.

Серед мовних і бібліотечних платформ для розпізнавання тексту варто зазначити відкрите програмне забезпечення (Tesseract OCR, Kraken) і хмарні сервіси (Google Vision API, Azure OCR). Багато з них використовують навчання на великих синтетичних та реальних наборах даних, що дозволяє підвищувати якість розпізнавання. Незважаючи на прогрес, залишаються важливі завдання: покращення точності розпізнавання рукопису, багатомовної підтримки та обробки складних макетів документів. Дослідники також працюють над розширенням систем для безперервних потоків тексту (наприклад, розпізнавання тексту у відео чи живих трансляціях).

### Огляд сучасних підходів до моніторингу серверної інфраструктури

Моніторинг серверної інфраструктури є критично важливим елементом забезпечення безпеки, стабільності та ефективності критичних систем, таких як дата-центри, телекомунікаційні мережі та хмарні платформи. Сучасні підходи до моніторингу поєднують традиційні методи аналізу даних із передовими технологіями штучного інтелекту (ШІ) та обробки великих даних, що дозволяє своєчасно виявляти

інциденти, прогнозувати потенційні загрози та оптимізувати роботу систем. Цей розділ аналізує ключові методи, інструменти та виклики, пов'язані з моніторингом серверної інфраструктури, з акцентом на їхню роль у створенні інтелектуальних вебсистем.

Аналіз серверних логів є основою моніторингу критичних систем, оскільки логи містять детальну інформацію про події, такі як системні помилки, спроби несанкціонованого доступу або пікові навантаження. Сучасні методи аналізу логів можна поділити на три основні категорії. По-перше, rule-based системи використовують заздалегідь визначені правила для ідентифікації відомих шаблонів, таких як повторювані помилки чи сигнатури кібератак. Ці системи прості у впровадженні, швидкі для обробки стандартних сценаріїв і широко застосовуються в інструментах, таких як Zabbix. Проте їхня ефективність обмежена при зіткненні з новими або нестандартними загрозами, оскільки вони не здатні адаптуватися до змінних умов без оновлення правил. Моделі машинного навчання (ML), такі як Random Forest, Support Vector Machines (SVM) або рекурентні нейронні мережі (LSTM), пропонують більш гнучкий підхід. Ці моделі навчаються на історичних даних, що дозволяє їм виявляти аномалії, які не відповідають нормальній поведінці системи, або прогнозувати майбутні інциденти. Наприклад, LSTM ефективно аналізує часові ряди логів, що допомагає виявляти послідовності подій, характерні для атак типу "розподілений відмова в обслуговуванні" (DDoS) [12-13].

Однак ML-моделі потребують значних обчислювальних ресурсів і якісних даних для навчання, що може ускладнити їхнє впровадження в системах із обмеженими ресурсами. Методи виявлення аномалій зосереджені на ідентифікації відхилень від нормальної поведінки системи. Наприклад, алгоритми кластеризації можуть групувати нормальні події та виділяти аномальні, такі як незвично високе навантаження на сервер. Інструменти, такі як Splunk і ELK Stack (Elasticsearch, Logstash, Kibana), забезпечують комплексну обробку логів, включаючи їх агрегацію, візуалізацію та аналіз у реальному часі. Основними викликами для цих методів є обробка великих обсягів даних, що генеруються сучасними системами, та зменшення кількості хибних спрацьовувань, які можуть відволікати операторів від реальних загроз.

Системи управління подіями та інформацією безпеки (SIEM) відіграють ключову роль у сучасних стратегіях кібербезпеки, забезпечуючи централізований підхід до збору, аналізу та реагування на інциденти безпеки в масштабі всієї IT-інфраструктури. Такі рішення, як IBM QRadar, Micro Focus ArcSight та Splunk Enterprise Security, дозволяють організаціям в режимі реального часу отримувати події з широкого спектра джерел - від серверів і робочих станцій до мережевих пристроїв, систем керування і прикладного програмного забезпечення. Основна функціональність SIEM зосереджена навколо трьох компонентів: централізованої агрегації логів, кореляції подій із метою виявлення складних шаблонів атак і створення умов для оперативного реагування. Наприклад, у ситуації з потенційною атакою нульового дня SIEM

може поєднати низку подій, таких як неуспішні спроби автентифікації, аномальний об'єм вихідного трафіку з певного сегмента мережі або запуск нетипових процесів, і на основі цього сформувавши тригер сповіщення для аналітиків безпеки [14]. Сам механізм кореляції ґрунтується на заздалегідь визначених або адаптивно створених правилах, які встановлюють логічні зв'язки між подіями, що на перший погляд можуть бути не пов'язаними між собою. Наприклад, якщо в логах контролера домену фіксується повторювана помилка входу для облікового запису адміністратора, а на міжмережевому екрані реєструється зовнішній доступ із підозрілої IP-адреси до того самого сегмента мережі, система може автоматично позначити ситуацію як індикатор компрометації.

Крім детектування, сучасні SIEM-платформи включають можливості автоматизованого реагування - від надсилання сповіщень до запуску скриптів, які можуть ізолювати вузол чи заблокувати обліковий запис, що підозрюється в компрометації. Однак, попри високу функціональність, впровадження та ефективне використання SIEM-систем пов'язане з низкою викликів. Розробка й оптимізація правил кореляції часто вимагає глибокого розуміння архітектури підприємства, а також специфіки бізнес-процесів і можливих векторів атак. Особливо це стосується складних гетерогенних середовищ, де джерела подій мають різну структуру, обсяг і частоту генерації даних. Крім того, класичні SIEM-рішення в основному орієнтовані на структуровані дані - логи, часові ряди, системні події - і мають обмежену здатність до обробки неструктурованої інформації, такої як звіти про вразливості, вільно сформульовані повідомлення користувачів або технічні описи інцидентів. Це створює потребу в доповненні SIEM-середовища інструментами, що використовують методи обробки природної мови (NLP), здатними витягувати цінну інформацію з текстів, класифікувати інциденти за контекстом і допомагати в прийнятті рішень на основі аналізу мови. Таким чином, інтеграція традиційних SIEM-рішень із сучасними аналітичними інструментами дозволяє не лише покращити точність виявлення, але й зробити реагування на інциденти більш гнучким, інформативним і адаптованим до реальних загроз. З огляду на зростання обсягу та складності даних, які генеруються сучасними інформаційними системами, SIEM-рішення еволюціонують у напрямку більшої автоматизації, масштабованості та інтеграції зі сторонніми джерелами аналітики. Це включає підтримку хмарних платформ, контейнеризованих середовищ і мікросервісної архітектури, де джерела подій можуть активно з'являтися й зникати, що вимагає від SIEM-гравців гнучких підходів до обробки нестатичних даних. Одним із напрямків розвитку є поєднання SIEM із системами розширеного виявлення та реагування (XDR), які дозволяють ширше охоплювати поверхню атаки, включаючи кінцеві точки, поштові системи, мережі та хмарні сервіси в єдиній аналітичній площині. Це особливо актуально для організацій, що працюють у моделі гібридної інфраструктури або активно впроваджують DevOps-підходи, де традиційні засоби контролю безпеки часто не встигають за швидкістю змін у середовищі.

Обробка даних у реальному часі стала не просто бажаною функціональністю, а обов'язковою умовою для забезпечення стійкості та надійності критичних інформаційних систем, де навіть незначна затримка в реакції на інцидент може спричинити серйозні наслідки для бізнесу або інфраструктури. У цьому контексті технології обробки потокових даних, зокрема Apache Kafka, Apache Flink або AWS Kinesis, набули широкого поширення завдяки своїй здатності обробляти величезні обсяги інформації в режимі, наближеному до реального часу. Так, Kafka часто використовується як високопродуктивний брокер повідомлень, який здатен забезпечити передачу і зберігання мільйонів подій на секунду, водночас гарантуючи послідовність, стійкість до відмов і масштабованість, необхідну для обробки телеметричних даних від тисяч серверів, додатків або IoT-пристроїв. На додачу, Flink, орієнтований саме на обчислення поверх потоку даних, дозволяє не просто фільтрувати чи орієнтувати події, а й реалізувати складні аналітичні операції, як-от виявлення аномалій, агрегації за часовими вікнами або реалізацію стано-орієнтованих автоматів без перерви на зберігання даних у сховищах. У середовищах з постійним інформаційним навантаженням, таких як хмарні інфраструктури або дата-центри, це відкриває можливість виявляти інциденти ще до того, як вони позначаються на кінцевих користувачах. Для прикладу, телеком-оператор може в реальному часі виявляти пікове навантаження в окремому сегменті мережі, миттєво активуючи автоматизовані скрипти переспрямування трафіку або масштабування ресурсів, що дає змогу уникнути перебоїв у наданні послуг. Проте реальна цінність такої оперативної аналітики розкривається лише тоді, коли вона поєднується з прогностичним аналізом, який дозволяє дивитися не тільки на те, що відбувається зараз, а й передбачати, що може трапитись у майбутньому. Моделі типу ARIMA [15] або Prophet [16] використовуються для обробки часових рядів, таких як завантаженість процесора, кількість запитів до API або температурні показники обладнання, що дозволяє формувати прогнози з урахуванням сезонності, циклічності чи раптових сплесків. Це надзвичайно важливо в системах, де планування потужностей має бути випереджальним: скажімо, у банківській інфраструктурі, де обсяги транзакцій суттєво зростають у конкретні дні або години, можливість заздалегідь масштабувати обчислювальні ресурси дозволяє уникнути збоїв і втрати клієнтів. Ще одним рівнем складності є інтеграція структурованих даних - як-от метрик чи логів - із неструктурованими джерелами, такими як текстові звіти про інциденти, електронні листи або описові записи аналітиків. Наприклад, за допомогою алгоритмів обробки природної мови (NLP) можна класифікувати типи атак, виявити повторювані сценарії чи формулювання, що вказують на наявність трендів, які варто врахувати в прогнозуванні [17].

Поєднання текстових описів з показниками систем дозволяє формувати багатовимірні моделі оцінки ризиків, де кожен новий сигнал аналізується не ізолювано, а в контексті історичного досвіду. Водночас ключовими технічними викликами залишаються підтримка мінімальної затримки в обробці великих обсягів

даних, забезпечення цілісності та послідовності потоків у складних архітектурах мікросервісів, а також необхідність ретельного збирання, нормалізації та зберігання історичних даних, які є критично важливими для навчання моделей прогнозування. Без якісного датасету жодна аналітична система не зможе дати адекватного прогнозу, навіть якщо сама по собі є надсучасною з точки зору архітектури чи алгоритмів.

### Концептуальна модель інтеграції вебсистем

Запропонована концептуальна модель інтеграції вебсистем поєднує модулі розпізнавання тексту та моніторингу інцидентів у єдину платформу, що дозволяє ефективно обробляти різноманітні інформаційні потоки. Ця модель спрямована на створення синергії між обробкою неструктурованих текстових даних (звітів, логів, документації) та структурованих даних (метрик, подій), що підвищує точність, швидкість і ефективність реагування на інциденти в критичних системах. Архітектура інтегрованої вебсистеми складається з двох основних модулів, які взаємодіють через чітко визначені потоки даних. Модуль розпізнавання тексту відповідає за обробку неструктурованих даних, таких як текстові звіти, логи, документація чи повідомлення. Цей модуль використовує технології обробки природної мови (NLP), такі як моделі BERT, GPT або RoBERTa, для витягнення семантичної інформації, класифікації тексту та аналізу настроїв. Наприклад, модель BERT може бути використана для категоризації звітів про кібератаки за рівнем загрози. Крім того, оптичне розпізнавання символів (OCR), реалізоване через інструменти, такі як Tesseract або Abbyy FineReader, дозволяє оцифровувати відскановані документи або зображення, що містять текстову інформацію, для подальшого аналізу [18].

Модуль моніторингу обробляє структуровані дані, такі як метрики продуктивності (навантаження CPU, використання пам'яті), системні події або логи. Цей модуль використовує методи аналізу аномалій, моделі машинного навчання (наприклад, Random Forest або LSTM) та SIEM-системи для виявлення інцидентів. Наприклад, SIEM-система може виявити аномальний мережевий трафік, а ML-модель може передбачити потенційний збій на основі історичних даних.

Потоки даних між модулями забезпечують інтеграцію: витягнена з текстових джерел інформація, наприклад, ключові слова чи описи подій, передається до модуля моніторингу для кореляції зі структурованими даними. Наприклад, якщо текстовий звіт містить інформацію про нову вразливість, модуль моніторингу може перевірити логи на наявність відповідних подій, таких як спроби експлуатації цієї вразливості. Ця архітектура підтримує хмарні технології, такі як AWS або Azure, для забезпечення масштабованості та обробки великих обсягів даних.

Інтеграція модулів розпізнавання тексту та моніторингу створює синергію, яка значно підвищує ефективність обробки інформаційних потоків. По-перше, швидше виявлення інцидентів досягається завдяки автоматичній обробці текстових даних. Наприклад, NLP-модель може проаналізувати звіт про нову кібератаку, витягнути ключові характеристики (тип атаки, уразливі системи) і передати цю інформацію модулю моніторингу для негайної перевірки відповідних логів. Це зменшує час, необхідний для ідентифікації загрози, порівняно з ручним аналізом. По-друге, більш повний аналіз забезпечується завдяки збагаченню структурованих даних текстовими. Наприклад, текстовий аналіз може ідентифікувати згадки про нову вразливість у звітах безпеки, які потім корелюються з метриками серверів для виявлення спроб її експлуатації. Це дозволяє створювати більш точну картину подій, враховуючи як кількісні (метрики), так і якісні (текстові описи) дані. По-третє, прогнозування загроз стає можливим завдяки аналізу трендів у текстових даних. Наприклад, частота згадок певного типу атак у звітах може вказувати на зростання їхньої популярності, що дозволяє модулю моніторингу налаштувати правила для раннього виявлення таких загроз. Алгоритми глибокого навчання, такі як трансформери, можуть аналізувати історичні текстові дані для прогнозування майбутніх інцидентів, що доповнює традиційні методи прогнозного аналізу, такі як ARIMA.

Ця синергія дозволяє інтегрованій системі не лише реагувати на поточні інциденти, але й проактивно запобігати майбутнім загрозам, що є ключовою перевагою для критичних систем.

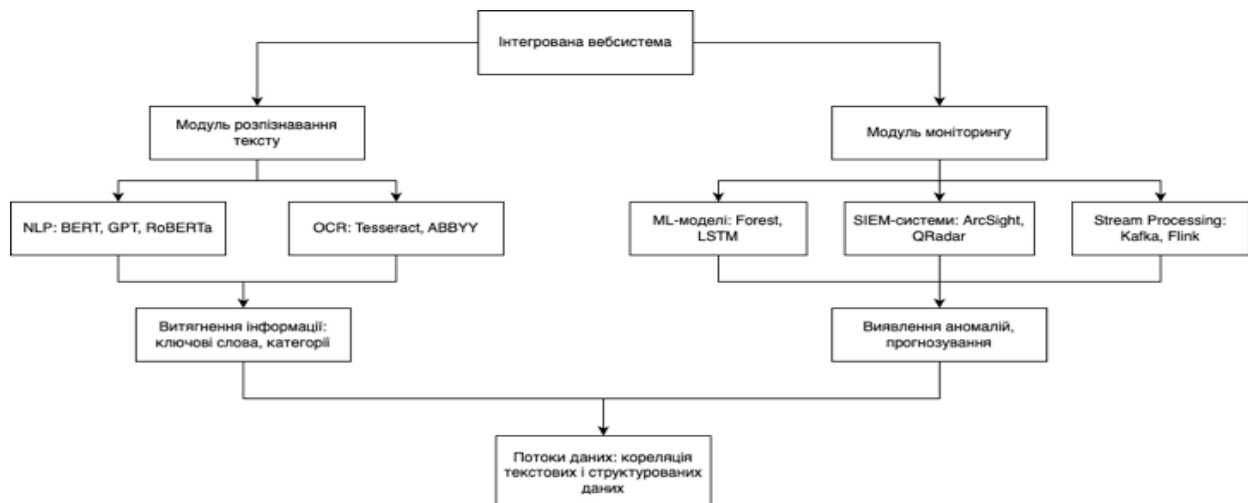


Рис. 1. Модель інтеграції вебсистем

Інтегрована вебсистема, що поєднує розпізнавання тексту та моніторинг, має широкий спектр застосувань у різних сферах, основні сценарії включають:

- кібербезпека: Інтегрована система може аналізувати текстові звіти про вразливості (наприклад, з баз CVE) і корелювати їх із логами серверів для виявлення спроб атак. Наприклад, витягнення інформації про нову вразливість у програмному забезпеченні може спонукати систему перевірити, чи використовується це ПЗ на серверах, і вжити превентивних заходів. SIEM-системи, інтегровані з NLP, можуть автоматично класифікувати текстові описи інцидентів, що зменшує час реагування;

- адміністрування серверів: Система може обробляти текстову документацію, таку як інструкції з конфігурації серверів, і автоматично порівнювати її з поточними налаштуваннями для виявлення невідповідностей. Наприклад, OCR може оцифрувати паперові інструкції, а NLP-модель може витягнути ключові параметри для порівняння з метриками серверів. Це спрощує адміністрування та знижує ризик людських помилок;

- розумні міста: У контексті розумних міст інтегрована система може аналізувати текстові звіти від датчиків, камер або операторів (наприклад, описи аварій на дорогах) і корелювати їх із структурованими даними, такими як трафік чи показники якості повітря. Наприклад, текстовий аналіз звітів про стан доріг може допомогти системі управління трафіком оптимізувати маршрути для аварійних служб [19].

Кожна з цих сфер має унікальні вимоги, але інтегрована система пропонує універсальний підхід до обробки різномірних інформаційних потоків. Наприклад, у кібербезпеці акцент робиться на швидкості реагування та точності кореляції, тоді як у розумних містах важлива масштабованість і інтеграція з IoT-пристроями.

### Виклики та обмеження

Розробка та впровадження інтелектуальних вебсистем, які інтегрують модулі розпізнавання тексту (NLP, OCR) і моніторингу (ML-моделі, SIEM-системи, stream processing), відкривають значні можливості для автоматизації обробки інформаційних потоків у таких сферах, як кібербезпека, адміністрування серверів і розумні міста. Проте реалізація такої системи стикається з численними викликами та обмеженнями, що охоплюють технічні, організаційні, етичні та масштабовальні аспекти. Ці перешкоди впливають на ефективність, доступність і застосовність системи, вимагаючи комплексного підходу до їхнього подолання. У цьому розділі детально розглядаються ключові виклики, їхній вплив на функціонування системи, а також пропонуються стратегії для їхнього вирішення, щоб забезпечити стабільність, точність і універсальність інтегрованих вебсистем.

Технічні виклики є одними з найкритичніших, оскільки інтелектуальні вебсистеми обробляють величезні обсяги різномірних даних у реальному часі. Одним із основних викликів є обробка великих обсягів даних, що генеруються серверними логами, метриками продуктивності, текстовими звітами та документацією. Наприклад, сучасні дата-центри можуть створювати

терабайти логів щодня, тоді як обробка текстових звітів про кіберзагрози за допомогою моделей глибокого навчання, таких як BERT чи GPT-4, вимагає значних обчислювальних ресурсів [20]. Ця проблема ускладнюється необхідністю аналізу даних у реальному часі для швидкого виявлення інцидентів, таких як кібератаки чи збої обладнання. Технології stream processing, як Apache Kafka або Apache Flink, хоча й ефективні, можуть зазнавати затримок під час пікових навантажень, що знижує оперативність реагування. Крім того, підтримка такої інфраструктури, особливо у хмарних середовищах, як AWS, Google Cloud чи Microsoft Azure, потребує значних фінансових витрат, що може бути непосильним для малих організацій або тих, що працюють у країнах із обмеженим доступом до високопродуктивних обчислень. Для вирішення цього виклику пропонується використання edge computing [21], що дозволяє попередньо обробляти дані на локальних пристроях, зменшуючи навантаження на центральні сервери. Також ефективними є методи оптимізації моделей ШІ, такі як дистильовання нейронних мереж, які знижують обчислювальні вимоги без значної втрати точності, та алгоритми стиснення даних для зменшення обсягів передачі інформації через мережі.

Іншим значним технічним викликом є інтеграція різномірних систем, що входять до складу інтелектуальної вебсистеми. Модуль розпізнавання тексту, який використовує NLP для аналізу звітів і OCR для оцифрування документів, генерує неструктуровані текстові дані, тоді як модуль моніторингу працює зі структурованими подіями, як метрики чи логи у форматі CEF, що підтримуються SIEM-системами, такими як ArcSight чи QRadar. Несумісність форматів даних, протоколів і API ускладнює їхню взаємодію. Наприклад, векторні представлення тексту, отримані з NLP-моделей, потребують трансформації для кореляції з подіями в SIEM, що може викликати затримки або втрату інформації. Крім того, OCR-системи, як Tesseract, часто видають неточні результати при обробці документів низької якості, що знижує надійність витягненої інформації. Для подолання цього виклику рекомендується розробка middleware-шарів, які уніфікують дані у стандартних форматах, як JSON або XML, а також використання відкритих стандартів обміну даними, таких як STIX/TAXII [22] для кібербезпеки. Контейнеризація за допомогою Docker і оркестрація через Kubernetes також можуть спростити розгортання та інтеграцію модулів, забезпечуючи їхню модульність і масштабованість.

Точність моделей ШІ та проблема хибних спрацьовувань є ще одним технічним обмеженням, бо такі моделі машинного навчання, як Random Forest чи LSTM, що використовуються для виявлення аномалій у логах, можуть неправильно класифікувати нормальні події як загрози (хибнопозитивні) або пропускати реальні інциденти (хибнонегативні) через недостатню якість тренувальних даних або складність сучасних кібератак. Аналогічно, NLP-моделі можуть інтерпретувати тексти з помилками, особливо якщо вони містять технічну термінологію чи багатозначні вирази. Наприклад, звіт про "фішинг" може бути неправильно класифікований як нешкідливий, якщо модель не врахує контекст. Це знижує довіру до системи та

може призвести до перевантаження операторів через необхідність перевірки хибних сигналів. Для підвищення точності пропонується використання ансамблевих методів, які комбінують кілька моделей для кращої класифікації, регулярне оновлення тренувальних наборів даних із урахуванням нових типів загроз, а також впровадження інтерфейсів для зворотного зв'язку, що дозволяють операторам коригувати помилки моделей у реальному часі [23, 24].

Організаційні виклики також суттєво впливають на впровадження інтелектуальних вебсистем, одним із них є нестача кваліфікованих фахівців, здатних розробляти, налаштовувати та підтримувати складні системи, що поєднують ШІ, кібербезпеку та обробку великих даних. Наприклад, налаштування кореляційних правил у SIEM-системах вимагає глибокого розуміння кіберзагроз, тоді як оптимізація NLP-моделей потребує знань у глибокому навчанні та обробці природної мови. У багатьох організаціях, особливо в економічно слабо розвинених країнах, таких фахівців бракує, що може затримати впровадження або знизити ефективність системи. Для вирішення цього рекомендується організація внутрішніх тренінгів, співпраця з університетами для підготовки спеціалістів, а також використання інструментів автоматизації, таких як AutoML, які спрощують створення та налаштування ML-моделей для некваліфікованих користувачів.

Опір змінам у організаціях є ще одним організаційним викликом, бо персонал, звиклий до традиційних методів, як ручний аналіз логів або rule-based системи, може чинити опір переходу до ШІ-базованих рішень через їхню складність і непрозорість. Наприклад, моделі глибокого навчання часто сприймаються як "чорний ящик", що ускладнює інтерпретацію їхніх рішень. Це може викликати недовіру, особливо в критичних сферах, як кібербезпека, де помилки мають серйозні наслідки. Для подолання цього пропонується проводити пілотні проекти, які демонструють переваги системи, розробляти інтуїтивно зрозумілі інтерфейси користувача для спрощення взаємодії, а також залучати працівників до процесу розробки, щоб підвищити їхню довіру та розуміння технології.

Відповідність регуляторним вимогам є важливим організаційним обмеженням, особливо для систем, що обробляють чутливі дані, як звіти про кібератаки чи метрики IoT-пристроїв у розумних містах. Міжнародні стандарти, такі як GDPR (ЄС), CCPA (Каліфорнія) або ISO/IEC 27001, вимагають суворого захисту персональних даних і прозорості обробки. Наприклад, текстовий аналіз звітів може включати імена чи IP-адреси, що підпадають під регуляції. Недотримання стандартів може призвести до штрафів або втрати репутації. Для вирішення цього необхідно впроваджувати механізми анонімізації даних, використовувати шифрування (наприклад, AES-256 для зберігання, TLS для передачі) і проводити регулярні аудиту безпеки, щоб забезпечити відповідність вимогам [25].

Упередженість моделей ШІ є серйозною проблемою, оскільки тренувальні дані можуть бути незбалансованими або містити історичні упередження. Наприклад, якщо набір даних для NLP складається переважно з англійських звітів про кіберзагрози,

система може погано обробляти тексти іншими мовами, такими як українська чи китайська, що обмежує її застосовність у глобальному контексті. Упередженість може призвести до несправедливих рішень, як-от ігнорування загроз, характерних для певних регіонів. Для вирішення цього пропонується використовувати різноманітні набори даних, застосовувати методи fairness-aware machine learning і проводити регулярне тестування моделей на упередженість за допомогою метрик, як-от demographic parity.

Інтеграція текстових і структурованих даних підвищує ризик витоку інформації, особливо якщо система обробляє чутливі дані, як звіти про вразливості чи персональні метрики IoT. Наприклад, вразливості в модулі OCR можуть дозволити зловмисникам отримати доступ до оцифрованих документів. Для захисту даних рекомендується впроваджувати диференційну приватність, яка додає шум до результатів обробки, зберігаючи їхню корисність, а також використовувати захищені протоколи, як HTTPS і SSH. Регулярне тестування на проникнення (penetration testing) також допоможе виявити та усунути вразливості.

Соціальні наслідки автоматизації, зокрема скорочення робочих місць, є важливим обмеженням, бо автоматизація моніторингу може замінити ручну працю, особливо для низькокваліфікованих аналітиків логів, що викликає соціальну напругу. Наприклад, у великих організаціях перехід до ШІ може призвести до протестів або зниження мотивації працівників. Для пом'якшення цього пропонується перекваліфікація персоналу для роботи з новими системами, створення ролей, пов'язаних із наглядом за ШІ, і акцент на гібридному підході, де людина і машина співпрацюють, а не конкурують.

Масштабованість системи також має свої обмеження, отже адаптація до різних доменів, таких як охорона здоров'я чи фінанси, є складною через специфіку даних і вимог. Наприклад, аналіз медичних звітів потребує обробки складної термінології, тоді як фінансові дані підпадають під регуляції, як PCI DSS. Для забезпечення універсальності рекомендується розробка модульної архітектури, яка дозволяє підключати спеціалізовані моделі, і використання transfer learning для адаптації NLP-моделей до нових доменів із мінімальними зусиллями. Обмеження в реальному часі, пов'язані з обробкою пікових навантажень, також ускладнюють масштабування. Наприклад, складні текстові запити, як аналіз багатосторінкових звітів, можуть перевантажити систему, знижуючи її продуктивність. Для цього пропонується використовувати розподілені обчислення, пріоритизацію критичних завдань (наприклад, виявлення атак) і кешування даних для зменшення затримок. Впровадження інтелектуальних вебсистем для автоматизації обробки та моніторингу інформаційних потоків стикається з комплексними викликами, які охоплюють технічні (обробка даних, інтеграція, точність), організаційні (кваліфікація, регуляції, опір змінам), етичні (упередженість, конфіденційність) і масштабовальні (адаптація, реальний час) аспекти. Подолання цих обмежень вимагає поєднання технологічних інновацій, таких як edge computing і стандартизація даних, організаційних

заходів, включаючи тренінги та аудити, і етичних практик, як анонімізація та fairness. Лише через комплексний підхід можна реалізувати повний потенціал таких систем, забезпечуючи їхню надійність, ефективність і універсальність у критичних сферах, як кібербезпека, адміністрування серверів і розумні міста.

### Висновки

Інтелектуальні вебсистеми, що поєднують методи штучного інтелекту, машинного навчання, обробки природної мови (NLP) та оптичного розпізнавання символів (OCR), є інноваційним рішенням для автоматизації обробки та моніторингу інформаційних потоків. Проведений аналіз демонструє їх значний потенціал у таких сферах, як кібербезпека, адміністрування серверів та управління інфраструктурою розумних міст. Ці системи забезпечують швидке виявлення інцидентів, прогнозування загроз і оптимізацію процесів завдяки інтеграції текстових і структурованих даних, що сприяє підвищенню ефективності та надійності критичних інформаційних систем.

Ключовими перевагами інтелектуальних вебсистем є їхня адаптивність, здатність до самонавчання та можливість обробки великих обсягів різномірних даних у реальному часі. Вони дозволяють автоматизувати складні завдання, такі як аналіз логів, розпізнавання тексту та кореляція подій, зменшуючи час реагування на

інциденти та знижуючи ризик людських помилок. Інтеграція модулів розпізнавання тексту та моніторингу створює синергію, яка забезпечує більш повний аналіз і проактивне запобігання загрозам, що є критично важливим для сучасних цифрових середовищ.

Однак реалізація таких систем пов'язана з низкою викликів, включаючи обробку великих обсягів даних, інтеграцію різномірних модулів, забезпечення точності моделей ШІ та відповідність регуляторним вимогам. Технічні обмеження, такі як висока обчислювальна складність і ризик хибних спрацьовувань, потребують оптимізації алгоритмів і використання технологій edge computing. Організаційні виклики, зокрема нестача кваліфікованих фахівців і опір змінам, підкреслюють необхідність тренінгів і пілотних проєктів. Етичні аспекти, такі як упередженість моделей і захист даних, вимагають впровадження механізмів fairness і анонімізації.

Перспективи подальших досліджень включають розробку модульних архітектур для підвищення масштабованості, вдосконалення алгоритмів глибокого навчання для обробки багатомірних і неструктурованих даних, а також інтеграцію з новими технологіями, такими як XDR і IoT. Подолання зазначених викликів дозволить реалізувати повний потенціал інтелектуальних вебсистем, забезпечуючи їхню універсальність і ефективність у різних сферах застосування.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Liu, J., Zhong, N., Yao, Y. et al. The Wisdom Web: New Challenges for Web Intelligence (WI). *Journal of Intelligent Information Systems* 20, 5–9 (2003). <https://doi.org/10.1023/A:1020945620934>
2. Market Research Intellect: Online OCR Software Market Size And Forecast (2025); <https://www.marketresearchintellect.com/product/global-online-ocr-software-market-size-and-forecast/>
3. Stryker, J. Holdsworth: What is NLP (natural language processing)? (2024); <https://www.ibm.com/think/topics/natural-language-processing>
4. IBM Inc.: What is infrastructure monitoring? (2023); <https://www.ibm.com/think/topics/infrastructure-monitoring>
5. R. Guha, "Toward the Intelligent Web Systems," 2009 First International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, Indore, India, 2009, pp. 459-463, doi: 10.1109/CICSYN.2009.25.
6. Boudabous Maroua, Pappa Anna. WebT-IDC: A Web Tool for Intelligent Dataset Creation A Use Case for Forums and Blogs, *Procedia Computer Science*, Volume 192, 1051-1060 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.08.108>.
7. Noetzold, D., Rossetto, A. G. D. M., Leithardt, V. R. Q., & Costa, H. J. de M.: Enhancing Infrastructure Observability: Machine Learning for Proactive Monitoring and Anomaly Detection. (2024); <https://doi.org/10.5753/jisa.2024.4509>
8. C. Garrido-Munoz, A. Rios-Vila, J. Calvo-Zaragoza. Handwritten Text Recognition: A Survey (2025). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.08417>
9. S. Rakesh, P. Kushal Reddy, V. Prashanth and K. Srinath Reddy. Handwritten text recognition using deep learning techniques: A survey. *International Conference on Multidisciplinary Research and Sustainable Development* (2024). <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439201126>
10. M. Li, T. Lv, J. Chen, L. Cui, Y. Lu, D. Florencio, C. Zhang, Z. Li, F. Wei. TrOCR: Transformer-based Optical Character Recognition with Pre-trained Models (2025) <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.10282>
11. J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, K. Toutanova. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding (2019). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.04805>
12. Popa, Sorin. "WEB Server monitoring." *Annals of University of Craiova-Economic Sciences Series 2.36* (2008): 710-715. <https://ideas.repec.org/a/aio/aucesse/v2y2008i11p710-715.html>
13. Zeng, Wenxian, and Yue Wang. "Design and implementation of server monitoring system based on SNMP." 2009 International Joint Conference on Artificial Intelligence. IEEE, 2009. <https://doi.org/10.1109/IJCAI.2009.34>
14. Mail, I. D. "The future of SIEM in a machine learning-driven cybersecurity landscape." *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education Vol 14.03* (2023): 1309-1314. <https://doi.org/10.61841/turcomat.v14i03.14392>
15. Teggi, P., Malakreddy, B., Teggi, P. P., & Harivinod, N. (2021). AIOPS prediction for server stability based on ARIMA Model. *Int. J. Eng. Res. Technol*, 10, 128-134. <https://doi.org/10.17577/IJERTV10IS120055>
16. Pasquadibisceglie, V., Scaringi, R., Appice, A., Castellano, G., & Malerba, D. (2024). PROPHET: explainable predictive process monitoring with heterogeneous graph neural networks. *IEEE Transactions on Services Computing*. <https://doi.org/10.1109/TSC.2024.3463487>
17. Sheeraz, M., Paracha, M. A., Haque, M. U., Durad, M. H., Mohsin, S. M., Band, S. S., & Mosavi, A. (2023). Effective security monitoring using efficient SIEM architecture. *Hum.-Centric Comput. Inf. Sci*, 13, 1-18. <https://doi.org/10.22967/HGIS.2023.13.023>

18. Tafti, Ahmad P., et al. "OCR as a service: an experimental evaluation of Google Docs OCR, Tesseract, ABBYY FineReader, and Transym." *Advances in Visual Computing: 12th International Symposium, ISVC 2016, Las Vegas, NV, USA, December 12-14, 2016, Proceedings, Part I 12*. Springer International Publishing, 2016. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-50835-1\\_66](https://doi.org/10.1007/978-3-319-50835-1_66)
19. FERNOAGA, Vlad Paul, et al. "OCR-based solution for the integration of legacy and-or non-electric counters in cloud smart grids." 2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME). IEEE, 2018. <https://doi.org/10.1109/SIITME.2018.8599200>
20. Koroteev, Mikhail V. "BERT: a review of applications in natural language processing and understanding." arXiv preprint arXiv:2103.11943 (2021). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.11943>
21. Varghese, Blessom, et al. "Challenges and opportunities in edge computing." 2016 IEEE international conference on smart cloud (SmartCloud). IEEE, 2016. <https://doi.org/10.1109/SmartCloud.2016.18>
22. Barnum, Sean. "Standardizing cyber threat intelligence information with the structured threat information expression (stix)." Mitre Corporation 11 (2012): 1-22. <https://www.mitre.org/sites/default/files/publications/stix.pdf>
23. Sheta, Sagar Vishnubhai. "Developing efficient server monitoring systems using AI for real-time data processing." (2023). <https://doi.org/10.2139/ssrn.5034125>
24. Kairatuly, Akhmetzhanov Batyrzhan, et al. "Development of a Security and Monitoring System for Server Equipment Utilizing IoT Technologies." 2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST). IEEE, 2024. <https://doi.org/10.1109/SIST61555.2024.10629465>
25. Massonet, Philippe, et al. "A monitoring and audit logging architecture for data location compliance in federated cloud infrastructures." 2011 IEEE international symposium on parallel and distributed processing workshops and PhD forum. IEEE, 2011. <https://doi.org/10.1109/IPDPS.2011.304>

Received (Надійшла) 16.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.08.2025

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Заїка Владислав Віталійович** – студент кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна;

**Vladyslav Zaika** – student, Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [v.v.zaika@student.csn.khai.edu](mailto:v.v.zaika@student.csn.khai.edu); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0007-1750-9419>.

**Чув Олег В'ячеславович** – студент кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна;

**Oleh Chuiev** – student, Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [o.v.chuiev@student.csn.khai.edu](mailto:o.v.chuiev@student.csn.khai.edu); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-3584-4380>.

**Морозова Ольга Ігорівна** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна;

**Olga Morozova** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [o.morozova@khai.edu](mailto:o.morozova@khai.edu); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-7706-3155>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57194517520>.

**Нікітіна Тетяна Сергіївна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна;

**Tetyana Nikitina** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [t.nikitina@khai.edu](mailto:t.nikitina@khai.edu); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0000-7549-1017>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56559630000&origin=resultlist>.

#### Intelligent web systems for automation of processing and monitoring of information flows

Vladyslav Zaika, Oleh Chuiev, Olga Morozova, Tetyana Nikitina

**Abstract.** In the conditions of rapid growth of digital data and information flows on the Internet, there is a growing need for automated methods of their processing and monitoring for effective data acquisition and making informed conclusions. In order to cope with this data flow, intelligent web systems are being created. They use artificial intelligence (AI), machine learning (ML) and other advanced technologies to automatically collect, analyze and present information. The main purpose of this article is a comprehensive review of intelligent web systems aimed at automating the processing and monitoring of information flows. The theoretical foundations of such systems are considered, including semantic technologies and artificial intelligence methods, as well as modern approaches to text recognition and analysis based on deep learning. An analysis of modern approaches to automated text recognition (OCR and deep learning methods) and modern server infrastructure monitoring tools is presented. A conceptual model of integration of components of text processing systems and infrastructure monitoring is proposed. Key challenges and limitations of this approach are highlighted, and promising directions for further research are outlined.

**Keywords:** intelligent web systems, information flows, automation, artificial intelligence, optical character recognition (OCR), infrastructure monitoring, machine learning, natural language processing (NLP), security information and event management (SIEM), Semantic Web.

О. І. Іванюк

Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

## МЕТОДОЛОГІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ОЦІНКИ ТЕМАТИЧНОЇ СПОРІДНЕНОСТІ НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ НА ОСНОВІ СЕМАНТИЧНОГО АНАЛІЗУ

**Анотація. Актуальність.** Автоматизована оцінка тематичної спорідненості між дисертаційними дослідженнями та профілями потенційних експертів потрібна для прозорого й відтворюваного добору офіційних опонентів і складу разових рад; відкриті дані NAQA.Svg роблять таку оцінку технічно можливою. **Об'єкт дослідження:** методи та засоби побудови семантичних профілів дисертацій і науковців та їх ранжування у спільному векторному просторі. **Мета статті:** розробити та емпірично перевірити методологію автоматизованої оцінки тематичної спорідненості наукових публікацій на основі семантичного аналізу. **Результати дослідження.** Сформовано корпус із 259 дисертацій, 662 профілів науковців і 3345 публікацій; тексти нормалізовано, назви публікацій стандартизовано засобами великої мовної моделі. Семантичні подання отримано за допомогою моделі OpenAI. Порівнювалися два варіанти подання дисертацій (повний опис; лише ключові слова) та науковців (публікації; ключові слова). Якість оцінювалася за фактичними призначеннями опонентів, використовуючи метрики NDCG, Hit@k і NDCG-lift. Найкращі результати стабільно показала комбінація «дисертація за ключовими словами» та «науковець за публікаціями», яка демонструє найвищу точність у верхніх позиціях і найбільший вигреш відносно випадкового відбору. **Висновки.** Поєднання профілю дисертації за ключовими словами з профілем науковця, агрегованим за публікаціями, забезпечує найкращий баланс точності та стійкості і є практично доцільним для попереднього добору опонентів. Запропонована методологія відтворювана, масштабована й узгоджена з відкритими даними; перспективні напрями – урахування часової ваги публікацій, двомовності термінів та процедурних обмежень під час остаточного призначення.

**Ключові слова:** тематична спорідненість; ембединги; косинусна подібність; призначення рецензентів; дисертації; профілі науковців; OpenAI text-embedding-3-large; UMAP; DBSCAN; NDCG; Hit@k; рекомендаційні системи; текстова аналітика, машинне навчання.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Оцінка тематичної спорідненості між науковими текстами та профілями дослідників є базовим інструментом для добору рецензентів, формування експертних рад і призначення наукових керівників.

У вітчизняній практиці цю потребу прямо закріплено в регуляторних вимогах до разових спеціалізованих вчених рад: члени рад мають бути компетентними саме за тематикою дисертації, що операційно визначається наявністю не менше трьох публікацій за темою дослідження, опублікованих протягом останніх п'яти років до дня утворення разової ради і після присудження власного ступеня (кандидата наук/доктора філософії) [1]. Процедурна прозорість і перевірюваність такої відповідності підтримуються інформаційною системою NAQA.Svg, що акумулює дані про склад разових рад і матеріали атестаційних процедур [2].

У сфері акредитації освітньо-наукових програм вимога тематичної відповідності також має нормативне відображення: методичні орієнтири для програм третього рівня роблять акцент на «навчання через дослідження» та узгодженості дослідницьких тем аспірантів із напрямками наукової діяльності їхніх керівників (підтверджується релевантними публікаціями), що відбивається у положеннях МОН про акредитацію та рекомендаціях НАЗЯВО щодо застосування критеріїв якості [3–5]. Таким чином, нормативна база послідовно вимагає змістовної (тематичної) відповідності і для складу рад, і для кадрового забезпечення PhD-програм.

На практиці ручна перевірка тематичної відповідності у разових радах і при доборі опонентів є трудомісткою, суб'єктивною та важко масштабованою: потрібно зіставляти зміст дисертацій із публікаційними профілями великої кількості потенційних експертів, враховуючи нормативні обмеження (компетентність саме за тематикою, публікації за останні п'ять років тощо) [1]. Запроваджена прозорість і відкритість процедур через інформаційну систему NAQA.Svg створює технічні передумови для автоматизованих інструментів попереднього тематичного відбору, які підвищують відтворюваність і швидкість процесу, зменшують ризики упередженості та пропуску релевантних фахівців, а також забезпечують аудиторність прийнятих рішень у відповідності до вимог Порядку [1, 2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У міжнародній літературі завдання автоматизованого призначення рецензентів (Reviewer Assignment Problem, RAP) зазвичай подають як триетапну схему:

I – побудова профілів заявки та рецензентів;

II – обчислення міри відповідності;

III – оптимізація призначень з урахуванням обмежень (баланс навантаження, конфлікти інтересів тощо) [6, 7].

На практиці застосовують як класичні системи (наприклад, Toronto Paper Matching System, SubSift), так і новіші підходи, що вдосконалюють як блок обчислення відповідності, так і оптимізаційні процедури призначення [8, 9].

Методи оцінювання тематичної спорідненості еволюціонували від лексичних (показник TF-IDF,

ключові слова) та латентних моделей (LSA, LDA) до семантичних векторних подань і контекстних мовних моделей (word2vec, BERT, SciBERT тощо). Огляди фіксують, що поєднання лексичних і семантичних ознак системно підвищує якість відповідності та стійкість до варіативності термінів [6–8, 10, 11].

Зокрема, [8] показано переваги ітеративної моделі WSIM, яка поєднує мовні та тематичні ознаки; у [11] продемонстровано ефективність тематичної експертизи для співставлення «стаття-рецензент»; застосування векторних подань (word2vec) також пропонувалося у фреймворках контентного зіставлення [10].

В українському контексті професором Сергієм Штовбою та доктором філософії Миколою Петриченком запропоновано підхід експрес-підбору для разових рад, що фокусується на швидкому звуженні великого пулу кандидатів за тематикою з наступним «тонким» добором. Автори підкреслюють важливість командного покриття тематики дисертації (щоб колектив членів ради сумарно охоплював усі аспекти теми) та демонструють покращення тематичної відповідності складу рад у середньому на 13–34% порівняно з ручним добором [12].

**Метою роботи** є розробка методології автоматизованої оцінки тематичної спорідненості наукових публікацій на основі семантичного аналізу, що реалізує етап II RAP (обчислення міри відповідності між дисертаційними дослідженнями та публікаційними профілями потенційних членів ради) із залученням універсальних моделей ембедингів OpenAI та відкритих даних інформаційної системи NAQA.Svr.

**Методи.** Використано відкриті дані NAQA.Svr, нормалізацію текстів, семантичні векторні подання (OpenAI text-embedding-3-large), проєкцію UMAP, кластеризацію DBSCAN, косинусну подібність для обчислення спорідненості та метрики NDCG@k, Hit@k і lift для оцінки якості.

Для мовного редагування рукопису застосовано асистента на основі штучного інтелекту ChatGPT (OpenAI).

## Основний матеріал

Позначимо множину потенційних експертів (науковців) через  $S = \{s_1, \dots, s_{|S|}\}$ . Кожному  $s \in S$  відповідає скінченна множина пов'язаних текстових одиниць  $U_s = \{u_1, \dots, u_{|U_s|}\}$  (наприклад, заголовки публікацій та/або конкатеновані ключові слова з їхніх публікацій).

Множину дисертацій (або інших заявок) позначимо через  $T = \{t_1, \dots, t_{|T|}\}$ , де кожному  $t \in T$  відповідає множина текстових одиниць  $V_t = \{v_1, \dots, v_{|V_t|}\}$  (наприклад, теми, ключові слова, анотації).

Нехай  $\phi: \text{Text} \rightarrow \mathbb{R}^d$  – фіксоване відображення тексту в евклідов простір  $\mathbb{R}^d$  (семантичне векторне подання, ембединг).

Профіль науковця векторизується як:

$$e_s = \text{Agg}_S(\{\phi(u) : u \in U_s\}) \in \mathbb{R}^d, \quad (1)$$

де  $\text{Agg}_S$  – оператор агрегації множини векторів (наприклад, середнє, зважене середнє, робастні усереднення тощо).

Аналогічно, профіль дисертації визначається як:

$$e_t = \text{Agg}_T(\{\phi(v) : v \in V_t\}) \in \mathbb{R}^d, \quad (2)$$

де  $\text{Agg}_T$  – оператор агрегації для дисертаційних одиниць.

Такий  $e_s$  інтерпретується як «тематичний центроїд» науковця.

Міра тематичної спорідненості між дисертацією  $t$  та науковцем  $s$  задається косинусною подібністю:

$$\text{sim}(t, s) = \frac{e_t^T e_s}{\|e_t\|_2 \|e_s\|_2} \in [-1, 1], \quad (3)$$

а за потреби відстань визначається як  $d(t, s) = 1 - \text{sim}(t, s)$ .

Для даної дисертації  $t$  розглядається множина допустимих кандидатів  $S_t \subseteq S$  (після застосування регуляторних та процедурних обмежень щодо конфлікту інтересів чи ролі у раді). Визначається функція оцінювання  $f_t(s) = \text{sim}(t, s)$  та індукована нею функція ранжування  $\pi_t$ , що впорядковує  $S_t$  за спаданням  $f_t(s)$ . Рекомендована множина  $k$ -кращих визначається як:

$$R_k(t) = \{s \in S_t : \text{rank}_{\pi_t}(s) \leq k\}, \quad (4)$$

де  $\text{rank}_{\pi_t}(s)$  – порядковий номер  $s$  у списку, 1 – найвища релевантність.

Для практичної реалізації дані збиралися з відкритих записів інформаційної системи NAQA.Svr у межах спеціальностей 121–126 за період червень 2022 – грудень 2024. Отримання відомостей здійснювалося шляхом автоматизованого доступу до вебсторінок з подальшим HTML-парсингом табличних блоків та вмісту модальних вікон зі списками публікацій членів ради.

Для кожного захисту фіксувалися:

- тема дисертації,
- анотація,
- ключові слова;
- персональні переліки публікацій кожного члена ради (ПІБ, роль у раді, афіліція, рік і ключові слова публікацій).

Первинні тексти проходили нормалізацію:

- приведення до нижнього регістру,
- уніфікація лапок і тире,
- видалення подвоєних пробілів;
- у формулюваннях тем прибиралися фінальні крапки;
- ключові слова очищувалися від технічних артефактів і зводилися до єдиного формату (нижній регістр, усунення порожніх елементів).

Назви публікацій уніфікувалися за допомогою автоматичного вилучення стандартної назви з бібліографічних або вільно сформованих описів із вико-

ристанням великої мовної моделі (GPT-4o-mini) через API OpenAI (інструктивний запит із вимогою повернути лише назву). Це дозволило усунути дублікати і зменшити шум у подальшому визначенні тематичної спорідненості.

У результаті сформовано корпус із 259 дисертацій (тема, ключові слова та анотація; спеціальні/закриті теми виключено), 662 унікальних науковців (голови, рецензенти, опоненти) і 3345 унікальних публікацій.

Семантичні подання текстів формувалися в єдиному просторі розмірності 1024 за допомогою універсальної моделі ембедингів OpenAI (text-embedding-3-large).

Для дисертацій було реалізовано два варіанти профілювання:

1) Д(ТКА) – вектор, отриманий із конкатенованого опису «тема + ключові слова + анотація»;

2) Д(КС) – вектор, побудований лише на основі ключових слів.

Аналогічно, для науковців сформовано два варіанти профілю:

1) Н(ПУБ) – агрегований вектор, що дорівнює середньому L2-нормованих ембедингів усіх публікацій науковця, де ембединг кожної публікації будувався з конкатенованого опису «назва + ключові слова»;

2) Н(КС) – ембединг конкатенованого списку всіх ключових слів публікацій науковця.

Таким чином, утворилося чотири комбінації для порівняльного аналізу. Єдиний простір і однакова розмірність забезпечують коректність використання косинусної подібності та роблять результати сумірними між різними комбінаціями профілів.

Візуальна перевірка простору ембедингів виконувалася за допомогою проєкції UMAP у двовимірний простір з подальшим виділенням щільніших груп методом DBSCAN.

На площині відображено окремо дисертації та профілі науковців; кластерні мітки присвоювалися автоматично, «шумові» точки відсікалися як ті, що не входять до жодного щільного скупчення.

Ілюстрації показують виразні тематичні групи й їхні перетини: наприклад:

- кластер «кібербезпека/інформаційна безпека»,
- великі скупчення «машинне/глибоке навчання»,
- спеціалізовані кластери «метод скінченних елементів/обчислювальна механіка», «управління проєктами», «БПЛА» тощо.

Для профілів науковців Н(КС) (рис. 1) спостерігається тонший поділ на теми (24 кластери, «шум»  $\approx 11.8\%$ ), ніж для профілів Н(ПУБ) (17 кластерів, «шум»  $\approx 9.4\%$ ).

Для профілів дисертацій Д(ТКА) виділено 15 кластерів («шум»  $\approx 11.2\%$ ), тоді як профілювання Д(КС) (рис. 2) – 13 кластерів із найменшою часткою «шуму» ( $\approx 4.2\%$ ).

Така картина узгоджується з інтуїцією: ключові слова забезпечують чіткіші тематичні межі, тоді як повний опис краще відтворює змістові перетини між темами.

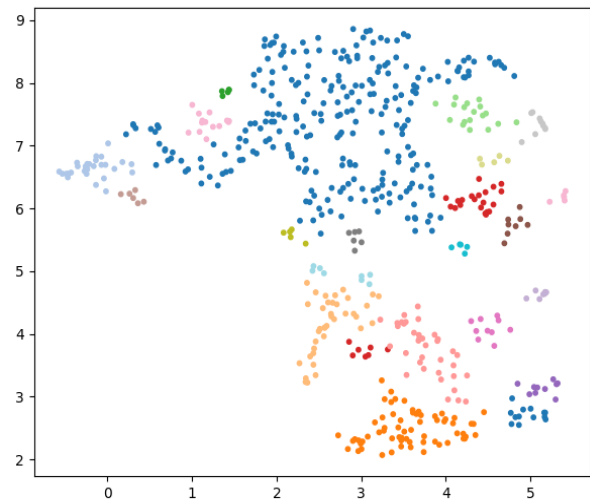


Рис. 1. UMAP+DBSCAN для профілів науковців Н(КС)

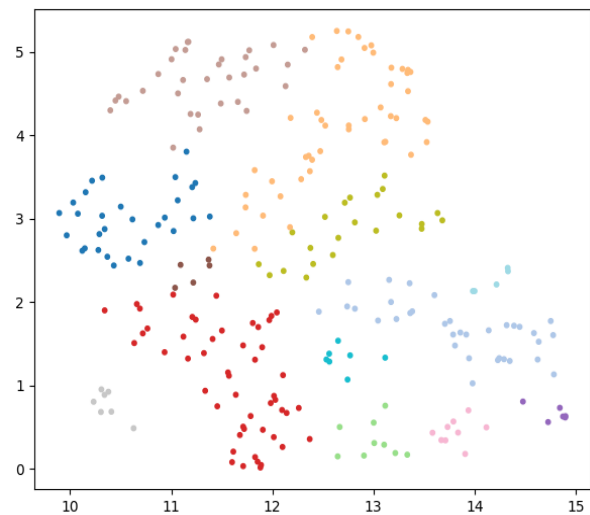


Рис. 2. UMAP+DBSCAN для профілів дисертацій Д(КС)

Оцінювання якості визначення тематичної спорідненості виконано на сформованому корпусі. Еталоном релевантності задавалися фактично призначені офіційні опоненти. Для кожної дисертації множина кандидатів формувалася з усіх профілів науковців за винятком інших учасників відповідної разової ради, після чого чотири комбінації профілів  $\{Д(ТКА), Д(КС)\} \times \{Н(ПУБ), Н(КС)\}$  порівнювалися за косинусною подібністю (3).

Ранжування оцінювалося за метрикою  $NDCG@k$  (чутлива до позицій співпадінь у верхній частині списку) та  $Hit@k$  (частка випадків, коли хоча б один опонент потрапив у  $k$ -кращих). Додатково розглядався коефіцієнт підсилення  $NDCG$  ( $NDCG$ -lift), тобто відношення значення метрики моделі до її випадкового еталона; невизначеність оцінювалася бутстреп-методом з 95% довірчими інтервалами. Графік із коефіцієнтом підсилення (рис. 3) демонструє стійку перевагу комбінації  $Д(КС) \leftrightarrow Н(ПУБ)$ : для малих  $k$  вона суттєво випереджає альтернативи, а зі збільшенням  $k$  зберігає найвищі значення при помірній ширині довірчих інтервалів.

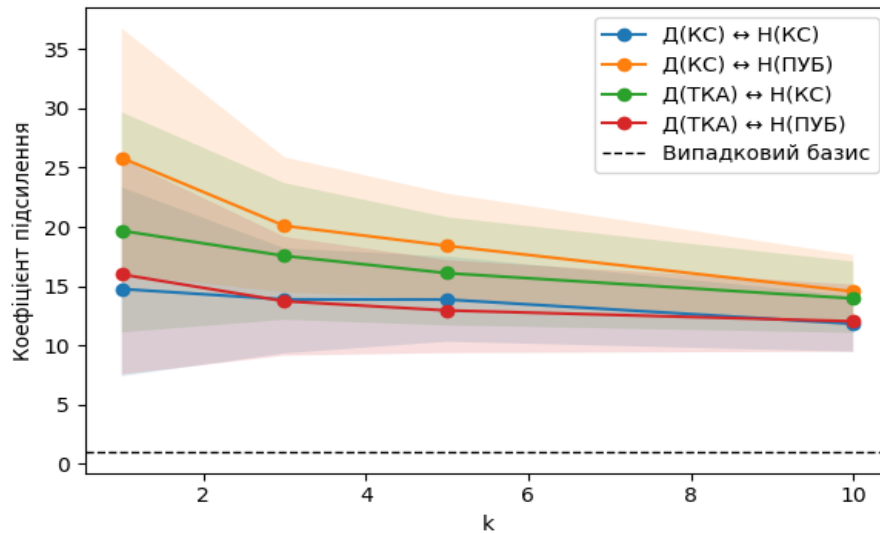


Рис. 3. Криві коефіцієнта підсилення NDCG для чотирьох комбінацій профілів дисертацій та науковців із 95% довірчими інтервалами

Друге місце стабільно посідає Д(ТКА)↔Н(КС); далі йде Д(ТКА)↔Н(ПУБ), тоді як Д(КС)↔Н(КС) показує найнижчі. Спадання коефіцієнта підсилення NDCG (рис. 1) із ростом  $k$  є очікуваним: базовий випадковий рівень поліпшується швидше, тож відносна перевага моделі зменшується.

Таблиця 1 – Середні значення метрик NDCG та Hit@k, а також коефіцієнти підсилення NDCG відносно випадкового базису.

Комбінація	k	NDCG	NDCG lift	Hit@k
Д(ТКА) ↔ Н(ПУБ)	1	0.05	15.98	0.05
	3	0.055	13.72	0.12
	5	0.072	12.94	0.174
	10	0.103	12.02	0.301
Д(ТКА) ↔ Н(КС)	1	0.062	19.67	0.062
	3	0.07	17.55	0.147
	5	0.089	16.09	0.208
	10	0.119	13.95	0.347
Д(КС) ↔ Н(ПУБ)	1	0.081	25.82	0.081
	3	0.08	20.09	0.17
	5	0.102	18.40	0.232
	10	0.124	14.54	0.317
Д(КС) ↔ Н(КС)	1	0.046	14.75	0.046
	3	0.056	13.87	0.127
	5	0.077	13.86	0.201
	10	0.101	11.81	0.309

Табл. 1 зі значеннями NDCG, Hit@k та коефіцієнтом підсилення NDCG підтверджує ці спостереження чисельно та дає інтуїцію щодо якості для різних довжин списку рекомендацій.

## Висновки

Розроблена методологія автоматизованого зіставлення дисертацій з профілями потенційних експертів у спільному семантичному просторі показала стабільну перевагу комбінації «дисертація за ключовими словами» у поєднанні з «профілем науковця, усередненим за публікаціями».

Такий результат узгоджується з інтуїцією: ключові слова концентрують тематичне ядро дослідження, а усереднення публікаційного профілю науковця надає стійку оцінку його наукового поля. Візуалізації (UMAP+DBSCAN) додатково підтверджують наявність виразних тематичних скупчень і помірних перетинів між темами.

Практична цінність підходу полягає у прозорому та відтворюваному попередньому доборі офіційних опонентів і формуванні складу разових рад, а також у задачах узгодження тем аспірантів із керівниками та пошуку зовнішніх рецензентів для конкурсних проєктів.

Метод легко інтегрується в наявні робочі процеси, забезпечуючи пояснювані рейтинги кандидатів і аудитованість рішень.

Подальший розвиток роботи вбачається:

- у запровадженні часових ваг для публікацій,
- використанні доменно-адаптованих моделей отримання ембедингів,
- застосуванні методів навчання для ранжування на історичних даних,
- інкорпорації графових сигналів (співавторство, інституційні зв'язки) та розробленні механізмів пояснюваності рекомендацій.

Такі розширення мають підвищити точність і стійкість без втрати прозорості та масштабованості запропонованого рішення.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кабінет Міністрів України. (2022). Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/44-2022-%D0%BF#Text>
2. Національне агентство із забезпечення якості вищої освіти. (2024). Порядок функціонування інформаційної системи «NAQA.Svr» (затверджено 30.08.2022; зі змінами від 19.11.2024). Available at: [https://naqa.gov.ua/wp-content/uploads/2025/04...8F-NAQA.Svr\\_22.04.2025.pdf](https://naqa.gov.ua/wp-content/uploads/2025/04...8F-NAQA.Svr_22.04.2025.pdf)
3. Національне агентство із забезпечення якості вищої освіти. (2020). Рекомендації для експертів Національного агентства стосовно акредитації освітніх програм третього рівня вищої освіти (додаток до «Методичних рекомендацій для експертів Національного агентства щодо застосування Критеріїв оцінювання якості освітньої програми»). Available at: <https://naqa.gov.ua/wp-content/uploads/2020/02....pdf>
4. Міністерство освіти і науки України. (2024). Про затвердження Положення про акредитацію освітніх програм, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти (Наказ № 686; зареєстровано в Міністерстві юстиції України 04.07.2024 № 1013/42358). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1013-24#Text>
5. Національне агентство із забезпечення якості вищої освіти. (2019). Методичні рекомендації для експертів Національного агентства щодо застосування Критеріїв оцінювання якості освітньої програми. Available at: <https://bit.ly/4gG5Yki>
6. Zhao, X., & Zhang, Y. (2022). Reviewer assignment algorithms for peer review automation: A survey. *Information Processing & Management*, 59(5), 103028. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2022.103028>
7. Aksoy, M., Yanik, S., & Amasyali, M. F. (2023). Reviewer assignment problem: A systematic review of the literature. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 76, 761–827. <https://doi.org/10.1613/JAIR.1.14318>
8. Tan, S., Duan, Z., Zhao, S., Chen, J., & Zhang, Y. (2021). Improved reviewer assignment based on both word and semantic features. *Information Retrieval Journal*, 24(3), 175–204. <https://doi.org/10.1007/s10791-021-09390-8>
9. Price, S., & Flach, P. (2017). Computational support for academic peer review: A perspective from artificial intelligence. *Communications of the ACM*, 60(3), 70–79. <https://doi.org/10.1145/2979672>
10. Ogunleye, O., Ifebanjo, T., Abiodun, T. N., & Adebisi, A. A. (2017). Proposed framework for a paper-reviewer assignment system using Word2Vec. *Proc. of the 4th Covenant University Conf. on E-Governance in Nigeria (CUCEN 2017)*. Covenant University Repository. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/322356955\\_Covenant\\_University\\_E-Governance\\_Conference\\_CUCEN\\_2017](https://www.researchgate.net/publication/322356955_Covenant_University_E-Governance_Conference_CUCEN_2017)
11. Mimno, D., & McCallum, A. (2007). Expertise modeling for matching papers with reviewers. *Proceedings of the 13th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 500–509. <https://doi.org/10.1145/1281192.1281247>
12. Штовба, С. Д., Петричко, М. В. (2024). Експрес-підбір опонентів для разових рад із захисту PhD-дисертацій. *Ukrainian Journal of Information Systems and Data Science*, 2(1), 41–54. <https://doi.org/10.31558/2786-9482.2024.1.4>

Received (Надійшла) 29.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.08.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Іваниук Олександр Ігорович** – доктор філософії, доцент кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна;

**Oleksandr Ivaniuk** – PhD, Associate Professor of Department of Information Technology, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [aleks.ivaniuk@gmail.com](mailto:aleks.ivaniuk@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-4007-2215>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57203140184>.

#### Methodology for automated assessment of thematic relatedness of scientific publications using semantic analysis

Oleksandr Ivaniuk

**Abstract. Relevance.** Automated assessment of thematic relatedness between doctoral theses and profiles of potential experts is needed for transparent and reproducible selection of official reviewers and composition of one-time specialized councils; the open NAQA.Svr data make such assessment technically feasible. **Object of research:** methods and tools for constructing semantic profiles of theses and researchers and for ranking them in a shared vector space. **Purpose of the article.** To develop and empirically validate a methodology for automated assessment of thematic relatedness of scientific publications based on semantic analysis. **Research results.** We assembled a corpus of 259 theses, 662 researcher profiles, and 3345 publications; texts were normalized, and publication titles were standardized using a large language model. Semantic representations were obtained with an OpenAI model. We compared two variants of thesis profiling (full description; keywords only) and two variants of researcher profiling (by publications; by keywords). Quality was evaluated against actual reviewer assignments using the metrics NDCG, Hit@k, and NDCG-lift. The best results were consistently achieved by the combination “thesis by keywords” and “researcher by publications,” which yields the highest top-rank accuracy and the largest gain over random selection. **Conclusions.** Combining a keyword-based thesis profile with a publication-aggregated researcher profile provides the best balance of accuracy and robustness and is practically suitable for preliminary reviewer selection. The proposed methodology is reproducible, scalable, and aligned with open data; promising directions include incorporating temporal weights of publications, handling bilingual terminology, and accounting for procedural constraints in final assignments.

**Keywords:** thematic relatedness; embeddings; cosine similarity; reviewer assignment; dissertations; researcher profiles; OpenAI text-embedding-3-large; UMAP; DBSCAN; NDCG; Hit@k; recommender systems; text analytics; machine learning.

Alla Kapiton<sup>1</sup>, Tamara Franchuk<sup>2</sup>, Dmytro Tyshchenko<sup>3</sup>, Alona Desiatko<sup>3</sup>, Rostyslav Zakharov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

<sup>2</sup> National Academy of Statistics, Accounting and Audit, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup> State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine

## REQUIREMENTS FOR MODERN PROCESSORS FOR SECURE OPERATION OF INFORMATION SYSTEMS AND NETWORKS

**Abstract.** The article considers the main requirements for the technical support of computer architecture for the security of information systems and networks. It is proved that the problem of information protection requires the organization of a whole complex of special protection measures to prevent the loss of information contained in its transmission channels. The possibilities and consequences of abuse of information transmitted through telecommunications channels, which are developing and improving intensively, have been identified, and means of their prevention have been investigated. Thus, today there is a modern technology for protecting information transmitted via telecommunications channels, the sphere of influence of which includes not only communication channels, but also switching centers, peripheral devices, terminals, communication administrators, local computer networks, etc. It is justified that the analysis of requirements for modern technical and software components, among which the leading place should be given to the processor, is in the focus of our research. The consequences of non-compliance with the proposed requirements for the technical support of the computer architecture, which is a potential threat and a possible catalyst for the danger of information systems and networks, are investigated. The feasibility of implementing special tools, methods, and measures to prevent information loss has been established. It was determined that a thorough analysis requires studying the components of the set of recommendations for optimizing processor selection, based on the components and requirements for the security of information systems and networks, which are not sufficiently considered in the publications of domestic and foreign scientists. An analysis of processors included in the rating of the best models in recent years according to various criteria was performed, and the problem of choosing the optimal processor to meet the need for ensuring information security in the network was studied. Advice and recommendations on their selection for the security of information systems and networks are presented in numerous studies. Ways of improving the system are proposed, which are important to consider when modernizing the existing system in order to enable further updating of its components.

**Keywords:** computer architecture, processor, information security, information systems, networks.

### Introduction

The possibility of abuse of information transmitted through telecommunications channels is developing and improving no less intensively than the means of preventing it. Therefore, the problem of information protection requires the organization of a whole complex of special protection measures to prevent the loss of information contained in its transmission channels. A comprehensive approach to information security involves the comprehensive development of all methods and means of information protection. Thus, today there is a modern technology for protecting information transmitted via telecommunications channels, which affects not only communication channels, but also switching centers, peripheral devices, terminals, communication administrators, local computer networks, etc. That is why the analysis of requirements for modern technical and software components, among which the leading place should be given to the processor, is the focus of our research. The intensive development of information transmission means and systems constantly requires ensuring information security, which consists in using special means, methods to some prevents information loss.

**Analysis of recent research and publications.** A thorough analysis also requires studying the components of the set of recommendations for optimizing processor selection, based on the components and requirements for the security of information systems and networks, which are not sufficiently considered in the publications of domestic and foreign scientists. Fahmi M., Muda I., Kesuma S. A. studied the requirements for digitization technologies and their

applied significance [1]. Gatrifi M., Al Amayri J., Tottoli M. study the components of computer architecture [2]. Franchuk T., Stepashkina K., Tyshchenko D., Karpunin I. constantly study the issues of design and development of information systems and the requirements for their effective functioning [3]. Desyatko A., Karpunin I. analyze the requirements for digitalization processes in various fields of science and technology [4]. Belfo F., Trigo A. study information systems, traditions and directions of their further improvement and modernization, justifying those technical requirements that must be taken into account when designing them [5]. Tyshchenko D., Franchuk T., Zakharov R., Moskalenko V. consider the issues of supporting modern security needs by different means [6]. Yang J., Song X., Xiong Y., Meng Y. study the problems of software development taking into account the security of information systems and networks [7]. Sukhorebry O., Nenich D. investigate the element of using multimodal artificial intelligence in the process of information networks [8]. Analysis of processors included in the rating of the best models in recent years according to various criteria and research into the problem of choosing the optimal processor to meet the need for ensuring information security in the network, advice and recommendations for their selection for the security of information systems and networks are presented in numerous studies [9–16].

### Main part

Requirements for the components and technical support of the architecture of modern technical means must be constantly analyzed, taking into account their widespread use in the field of ensuring the security of

information systems and technologies. This topic is relevant and deserves the attention of scientists for conducting scientific research, both domestic and foreign scientists who constantly monitor these issues and publish the results of their achievements in numerous open publications [9–16].

Modern computers and laptops are becoming more powerful thanks to high-quality processors. Let's consider the advantages and disadvantages of processors, wich based on the analysis. Automation of processes occurring in financial institutions is a complex problem, especially when it comes to a systemic approach, that is, the interconnection of all elements and components. Therefore, when designing automated systems, the software developer uses appropriate standards - principles, general requirements and regulations that are mandatory. The basis of information systems design standards is scientific and methodological provisions and recommendations for the design of automated control systems, which are currently enshrined in the state standard. These include the principles of consistency, development, compatibility, standardization and unification, and efficiency. Information security of information systems and networks consists of technical and psychological components. The technical part includes a Firewall - a program for controlling data transmission, which is a filter and a kind of security system. In order to be sure that the "right" people are logging in to sites under certain logins and passwords, CHAP (Challenge-Greeting Authentication Protocol) is used - an algorithm for verifying authenticity based on transmitting not the user's password, but indirect information about him. A major threat to information security on the network is posed by various USB media that are used to transfer various information within a particular organization. USB interface designed to transfer information for medium-speed and low-speed peripheral devices.

The four-conductor cable used to connect to the USB bus consists of two wires (twisted pair) designed to receive and send data, and two more wires to power the peripheral device, which eliminates the need for the peripheral device's own power supply. The maximum current that can be consumed by the USB bus power lines is limited to 500mA. For the new USB 3.0 specification, these limits are 900mA. USB Hub – allows you to connect multiple devices to one computer. Systems such as XNS (Xerox Network Services) - a protocol that allows you to use files on another computer, and NOS (Network Operating System) - an OS for sharing files, greatly protect the user from unauthorized use of information [12].

Computer network security is an important aspect for protecting confidential information, important data, and ensuring the normal operation of computer systems and networks. Depending on the specific organization or enterprise, the level of security of computer networks may vary, but it is always important to take the maximum possible measures to protect important information and ensure the stable operation of systems. The functions and tasks of information protection determine the composition and structure of protection

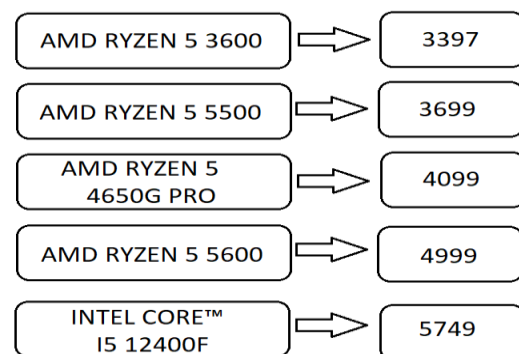
methods and systems. This subjectivism of direct implementation can be divided into two groups: - threats, the implementation of which is carried out with the constant participation of a person (the attacker); - threats, the implementation of which is carried out by appropriate computer programs without direct human participation.

The requirements for effective security of information systems and networks now consist of updating platforms and using modern, latest processors. A computer with a fresh CPU will be more productive, there will be more opportunities for upgrading and improving the assembly. On the other hand, solutions for a platform with DDR4 memory will cost much less, and the performance of such systems is still sufficient for most current tasks. The leading place is occupied by Dimensity 9300, the main performance characteristics are: Manufacturer: MediaTek; Rating: 98 A+; AnTuTu score: 2257733; Geekbench score: 2239 / 7538; Number of cores: 8 (1+3+4); Frequency: 3250 MHz; Graphics processor: Mali-G720 MP12. When choosing models for effective work, you should focus on:

- price/performance ratio (we took into account not only the cost of the processor itself, but also the motherboard, since with equal performance, the price of some sets can differ significantly);
- a reserve for the future (a newer processor remains relevant longer, is supported by drivers, it is easier to find relevant components for it, has higher energy efficiency, and therefore, there is a chance to save a little on the power supply).

While investigating the requirements for information security of the hardware component of modern computers, let's analyze the financial characteristics of modern processors. (average price in April last year), the most important of which are presented on Fig. 1–3 [9].

Intel has improved its processors in the 14th generation, and buying them is advisable only for ardent fans of the brand, but not for those who are looking for the best models. AMD, on the contrary, is in no hurry to release the 9000-series desktop Ryzen, but is refining the old ones, which is bearing fruit. When examining the information security requirements of the hardware component of modern computers, in particular processors, their technical performance characteristics can be summarized in Fig. 4 [9].



**Fig. 1.** Cost characteristics of modern budget processors

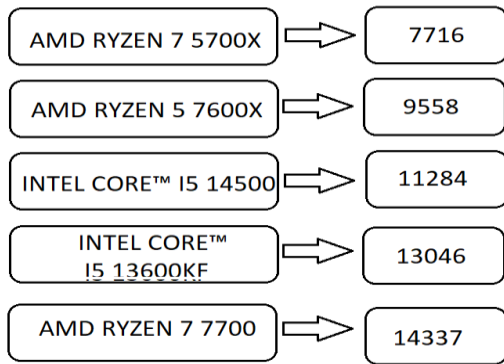


Fig. 2. Cost characteristics of mid-priced processors

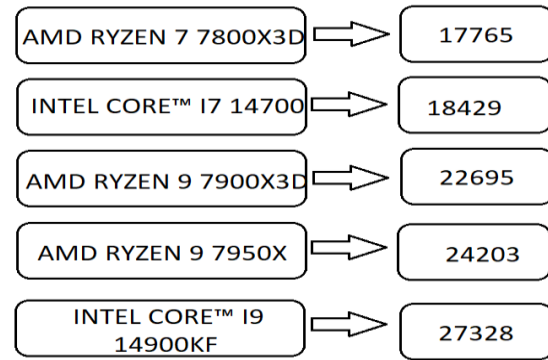


Fig. 3. Cost characteristics of high-cost processors

Processor	Single-thread	CPU Mark/ Multi-thread	Gaming Performance
Ryzen 5 3600	2569	17795	3,733
Ryzen 5 5500	2895	17985	3,687
Ryzen 5 4650G Proc	2900	17172	3,715
Ryzen 5 5600	3259	21655	4,625
Core i5 12400F	3704	25844	4,751
Ryzen 7 5700X	4015	28844	5,17
Ryzen 5 7600	4930	24630	5,85
CORE I5 14500	4870	26630	5,915
CORE I5 13600KF	5286	48630	6,79
Ryzen 7 7700	4276	36569	5,769
RYZEN 7 7800X3D	5849	51068	6,85
CORE™ I7 14700	4257	41772	5,799
RYZEN 9 7900X3D	5283	52505	6,795
RYZEN 9 7950X	5940	63609	5,947
CORE I9 14900KF	6016	59511	7,590

Fig. 4. Performance summary table

Support for the latest memory and interface standards is required, as is the widespread adoption of DDR5 and PCIe 5.0, which will provide higher bandwidth and system speed. Improvements in cooling

technologies are leading to the use of innovative solutions, such as new materials and designs for cooling systems, which will help maintain stable operation even under high loads.

It is advisable to properly plan system upgrades, namely when building a new PC or upgrading an existing system, it is important to consider not only current needs, but also the possibility of future component upgrades.

This will save money in the future and ensure the system remains relevant for several years. Lead recommendations should be identified for planning system upgrades. It is necessary to choose a motherboard that supports the latest standards (DDR5, PCIe 5.0), which will allow you to easily upgrade the processor or memory in the future and take into account the possibility of gradually upgrading the system without spending too much at once. It is necessary to analyze the opinions of experts about future technological trends in order to make informed decisions about component upgrades.

The subjects of relations related to information processing in the network are: - information owners or authorized persons; - network owners or authorized persons; - information users; - Local area network users. Access to information stored, processed, and sent to the network occurs only in accordance with access delimitation rules established by the owner of the information or a person authorized by him.

Without the consent of the owner, access to information processed on the network occurs only in cases provided for by applicable law.

Information protection on the network is ensured by:

– compliance by legal entities with standards, requirements and principles of an organizational and technical nature regarding the protection of information being processed;

– use of computer equipment, software, communication and generally automated systems, information protection tools that meet the established requirements for information security (have the appropriate certificate);

– verification of compliance of computer equipment, software, communication devices and automated systems with a total of established information protection requirements (certification of computer devices, communication devices and automated systems);

– information protection control.

## Conclusions

There is no need to justify the importance of ensuring effective data protection through modern information security services, as well as improving all means of compliance with legal norms in this area. That is why the need to study the key components of network protection and individual technical issues related to information security is within the scope of our study, which is not exhaustive.

Further in-depth research will help to realize how important it is to take a comprehensive approach to security, combining technical solutions with other technical components of its regulation and provision in a world of rapid innovation.

Each of these services is designed to combat a certain type of attack, which should not be confused with the real security mechanisms implemented in them. Knowledge of basic security requirements allows you to actively use them to resist attacks, which is mediated by additional technical requirements for the composition of the technical park and its components.

## REFERENCES

1. Fahmi M., Muda I., Kesuma S. A. Digitization Technologies and Contributions to Companies towards Accounting and Auditing Practices. *International Journal of Social Service and Research*, 2023. Vol. 3, no. 3. URL: <https://doi.org/10.46799/ijssr.v3i3.298>
2. Al Ghatrifi M. O. M., Al Amairi J. S. S., Thottoli M. M. Surfing the technology wave. *Computers and Education: Artificial Intelligence*. 2023. no. 4. URL: <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2023>
3. Tyshchenko D., Franchuk T., Stepashkina K., Karpunin, I. Проектування та розробка системи корпоративного електронного документообігу. *Європейський науковий журнал Економічних та Фінансових інновацій*. 2024. № 1(13). С. 200-207.
4. Franchuk T., Tyshchenko D., Desiatko A., Karpunin I. Features of accounting digitalization processes. *Galician economic journal*, 2025, vol. 95, no 1, pp. 61-66.
5. Belfo F., Trigo A. Accounting Information Systems: Traditions and Future Directions. *Accounting Information Systems – Tradition and Future Directions*. 2013. С. 536–546.
6. Tyshchenko D., Franchuk T., Zakharov R., Moskalenko V. Підтримка динамічних потреб безпеки засобами VPN Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава: ПНТУ, 2024. Т. 3 (77). 149-152.
7. Yang J., Song X., Xiong Y., Meng Y. An Open Source Software Defect Detection Technique Based on Homology Detection and Pre-identification Vulnerabilities, *International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*. 2018. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-93554-6\\_94](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-93554-6_94)
8. Капітон А., Сухоребрий О., Ненич Д. Використання мультимодального штучного інтелекту в економіці, освіті, науці та транспорті. *Інформаційні технології та цифрова економіка*. Київ, 2024. 83-85.
9. TOP 15 processors – Ranking of the best models of 2024. URL: [https://brain.com.ua/ukr/brain\\_guide/TOP-15-processori--Reyting-naykraschih-modeley-2024-roku/?srsltid=AfmBOoqtP\\_wuuSw23tX1wzcX-E96A78z78k6iBvEii8KwGqd2dc1R-W](https://brain.com.ua/ukr/brain_guide/TOP-15-processori--Reyting-naykraschih-modeley-2024-roku/?srsltid=AfmBOoqtP_wuuSw23tX1wzcX-E96A78z78k6iBvEii8KwGqd2dc1R-W)
10. Top 10 popular processors URL: <https://mezha.media/articles/top-10-populiarnykh-protseoriv/>
11. How to choose the optimal processor for your computer - tips and recommendations URL: <https://mediacom.com.ua/yak-vibrati-optimalnij-protseor-dlya-vashogo-kompyutera-poradi-ta-rekomendatsii>
12. How to choose a processor for your PC in 2025 URL: <https://superkomp.com.ua/yak-vibrati-procesor>
13. Security of information systems and networks URL: [https://klastar.ua/ua/stati-i-obzory/informacionnaja-bezopasnost-seti/?srsltid=AfmBOor7KleY9vHOMg669VfiGfDekagkJeAwODzZPwO3O\\_7jh8og\\_EN](https://klastar.ua/ua/stati-i-obzory/informacionnaja-bezopasnost-seti/?srsltid=AfmBOor7KleY9vHOMg669VfiGfDekagkJeAwODzZPwO3O_7jh8og_EN)

14. Computer network security URL: <https://a-si.com.ua/kompleksni-systemy-bezpeky/bezpeky-kompyuternyh-merezh/>
15. What is cybersecurity? URL: <https://nordvpn.com/uk/cybersecurity/what-is-cybersecurity/>
16. Information security services URL: <https://hackyourmom.com/pryvatnist/merezheva-bezpeka-poslугy-informacijnoyi-bezpeky-ta-pravovi-aspekty-zahystu-merezi/>

Received (Надійшла) 29.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.08.2025

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

- Капітон Алла Мирославівна** – доктор педагогічних наук, професорка, професор кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;  
**Alla Kapiton** – Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer and Information Technologies and Systems, Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Poltava, Ukraine;  
e-mail: [kits\\_seminar@ukr.net](mailto:kits_seminar@ukr.net); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-7845-0883>.
- Франчук Тамара Михайлівна** – кандидат економічних наук, доцент кафедри обліку, аудиту та оподаткування, Національна академія статистики, обліку та аудиту, Київ, Україна;  
**Tamara Franchuk** – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Accounting, Auditing and Taxation, National Academy of Statistics, Accounting and Auditing, Kyiv, Ukraine;  
e-mail: [Tamara.Franchuk@ukr.net](mailto:Tamara.Franchuk@ukr.net); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-7615-1276>.
- Тищенко Дмитро Олександрович** – доцент, кандидат економічних наук, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки; Державний торговельно-економічний університет, Київ, Україна;  
**Dmytro Tyshchenko** – Associate Professor, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Software Engineering and Cybersecurity; State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine;  
e-mail: [tyshchenko\\_d@knu.edu.ua](mailto:tyshchenko_d@knu.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2193-9012>.
- Десятко Альона Миколаївна** – доцент, кандидат технічних наук, в.о. завідувача кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки, Державний торговельно-економічний університет, Київ, Україна;  
**Alona Desiatko** – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, PhD, Acting head of the Department of Software Engineering and Cyber Security; State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine;  
e-mail: [desyatko@knu.edu.ua](mailto:desyatko@knu.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2284-3418>.
- Захаров Ростислав Геннадійович** – викладач кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки; Державний торговельно-економічний університет, Київ, Україна;  
**Rostyslav Zakharov** – senior lecturer of the department of Software Engineering and Cybersecurity; State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine;  
e-mail: [r.zakharov@knu.edu.ua](mailto:r.zakharov@knu.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0003-1433-7755>.

#### Вимоги до сучасних процесорів зادля безпеки функціонування інформаційних систем та мереж

А. М. Капітон, Т. М. Франчук, Д. О. Тищенко, А. М. Десятко, Р. О. Захаров

**Анотація.** У статті розглянуто основні вимоги до технічного забезпечення архітектури комп'ютера задля безпеки інформаційних систем та мереж. Доведено, що проблема захисту інформації потребує організації цілого комплексу спеціальних заходів захисту з метою попередження втрати інформації, яка міститься в каналах її передачі. Визначені можливості та наслідки зловживань інформацією, яка передається каналами телекомунікацій, які розвиваються та вдосконалюються інтенсивно, та досліджено засоби їх попередження. Таким чином, нині існує сучасна технологія захисту інформації, яка передається каналами телекомунікацій і в сферу впливу якої потрапляють не тільки канали зв'язку, але й центри комутації, периферійні пристрої, термінали, адміністратори зв'язку, локальні комп'ютерні мережі тощо. Обґрунтовано, що аналіз вимог до сучасних технічних та програмних складових, серед яких провідне місце слід віддати процесору, перебуває в центрі уваги нашого дослідження. Досліджено наслідки недотримання запропонованих вимог до технічного забезпечення архітектури комп'ютера, що є потенційною загрозою та можливим каталізатором небезпеки інформаційних систем та мереж. Визначено, що провідне місце у комплексному підході до інформаційної безпеки, що передбачає комплексний розвиток усіх методів та засобів захисту інформації займає саме технічне забезпечення, а саме компоненти архітектури комп'ютера. Встановлено доцільність впровадження спеціальних засобів, методів та заходів, щоб запобігти втраті інформації. Визначено, що ґрунтовного аналізу вимагає вивчення компонентів сукупності рекомендацій щодо оптимізації вибору процесору, що ґрунтується на складових та вимогах щодо безпеки інформаційних систем та мереж, які недостатньо розглянуто в публікаціях вітчизняних та закордонних вчених. Виконано аналіз процесорів, що входять за різними критеріями до рейтингу найкращих моделей в останні роки та дослідження проблеми вибору оптимального процесору для задоволення потреби забезпечення безпеки інформації в мережі, поради та рекомендації при їх виборі для безпеки інформаційних систем та мереж представлений в численних дослідженнях. Запропоновано шляхи вдосконалення системи, які при модернізації існуючої системи важливо враховувати з метою можливості подальшого оновлення її компонентів.

**Ключові слова:** архітектура комп'ютерів, процесор, інформаційна безпека, інформаційні системи, мережі.

S. Kuzhel<sup>1</sup>, A. Lytvynov<sup>1</sup>, O. Pliekhov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup> V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

## METHODS FOR ANALYZING SOFTWARE SOURCE CODE

**Abstract. Relevance.** The study of methods for analyzing source code is driven by several current trends in the field of software engineering. On the one hand, the increasing complexity and scale of software solutions necessitate the enhancement of software quality and stability. On the other hand, the growing frequency of cyber threats demands greater attention to the security of source code. Modern software systems are involved in critical areas such as financial operations, healthcare, industrial automation, and infrastructure management. Errors and deficiencies in such systems can lead to serious consequences, including significant economic losses, failures in the operation of essential services, and even threats to human life. In an environment of intensifying competition and rapid digitalization, software quality has become a key factor in the success of companies in the market. The implementation of effective source code analysis methods is becoming essential not only for large enterprises, but also for small and medium-sized businesses seeking to develop reliable and secure software solutions. Emphasis should be placed on the promising potential of integrating modern technologies of artificial intelligence and machine learning into the process of code analysis. Such approaches enable the automatic detection and classification of errors, which significantly reduces the time required for their identification and resolution, while also improving the accuracy and efficiency of the analysis. Thus, the development and deepening of research in the field of source code analysis methods is a vital task of modern software engineering, as it enables the resolution of urgent challenges related to software quality assurance and system security. **The object of research.** the source code of software is considered a structure subject to formal, semantic, and behavioral analysis, aimed at identifying errors, vulnerabilities, architectural flaws, and violations of coding standards. **Purpose of the article.** The study focuses on existing methods of source code analysis, particularly static and dynamic approaches, their tool support, and the prospects of applying modern technologies, especially artificial intelligence, to enhance the efficiency of error detection, and to ensure the quality, reliability, and security of software code throughout all stages of the software development lifecycle. **Research results.** The classification of software source code analysis methods has been systematized, including static, dynamic, hybrid, and intelligent approaches. A comparative analysis of static and dynamic techniques has been conducted based on key criteria such as efficiency, error coverage, resource intensity, and applicability at various stages of the software development lifecycle. Typical categories of errors detectable through dynamic analysis have been identified, including memory leaks, resource access errors, and performance issues. The potential of intelligent tools, particularly neural network-based models such as code2vec and VulLibMiner, has been examined for automated analysis and vulnerability prediction. The feasibility of a comprehensive approach that integrates both static and dynamic analysis has been substantiated as the most effective strategy for ensuring the quality and security of software systems. **Conclusions.** Static analysis is effective for early error detection and ensuring code compliance with established standards. Dynamic analysis is essential for identifying runtime errors such as memory leaks and race conditions. Neither method is universal; the best results are achieved through their combination. Intelligent approaches (AI/ML) significantly enhance the automation and accuracy of code analysis. The comprehensive implementation of code analysis contributes to the development of secure, high-quality, and maintainable software.

**Keywords:** source code analysis, static analysis, dynamic analysis, software defects, code security, software quality, analysis tools, artificial intelligence, machine learning, automated verification, code2vec, VulLibMiner, CI/CD.

### Introduction

Modern information technologies have fundamentally transformed approaches to software development. The complexity of software products continues to increase, which in turn raises the risks of errors, vulnerabilities, and deficiencies in the source code. For this reason, the effective application of source code analysis methods has become critically important. Their main objective is to ensure code quality, security, reliability, and compliance with established standards. These analysis techniques assist developers in quickly identifying and eliminating errors, which ultimately helps reduce the time and resources required for software development and testing.

Depending on the verification approach, analysis methods are generally categorized into static (performed without executing the code) and dynamic (conducted during program execution). Static analysis enables the detection of syntactic and semantic errors, logical flaws, and vulnerabilities at early development stages, while

dynamic analysis allows for the observation of program behavior under real operating conditions, identifying resource leaks, memory handling issues, multithreading errors, and other problems that are difficult to predict using static methods alone.

In recent years, the integration of artificial intelligence into source code analysis methods has significantly increased. The use of machine learning enables the automation of the analysis process, the classification of errors, and the prediction of their occurrence – all of which substantially enhance the efficiency and quality of software development.

**Review of Recent Studies and Publication.** The issue of source code analysis is actively explored in the context of software quality assurance, software testing, and information security. Most academic publications classify analysis methods into static, dynamic, and hybrid categories, while also highlighting the growing importance of automated tools and machine learning algorithms. In article [1], the authors describe the development and deployment of Google's internal tool called

Tricorder. It is a scalable ecosystem for static source code analysis. The primary goal of the project was to create a system capable of detecting bugs and vulnerabilities in code before execution, fully integrated into developers' daily workflows. Tricorder supports multiple programming languages and operates on a modular architecture, allowing for the inclusion of various analyzers. A distinctive feature of the platform is its scalability, the ability to continuously update verification rules, and a focus on automated, real-time feedback delivery. The article demonstrates how static analysis can be organically integrated into large-scale production workflows to improve overall software quality in high-intensity development environments.

Article [2] is dedicated to Google's experience with the use of the static analysis tool FindBugs in Java projects. The authors describe the Fixit initiative, a focused effort in which developers dedicated time exclusively to resolving issues identified by FindBugs. During the experiment, thousands of defects were analyzed, most of which fell into categories such as null reference errors, incomplete initialization, and the use of potentially dangerous programming patterns. Notably, numerous defects were discovered even in well-tested code that had previously gone unnoticed. The authors conclude that the regular application of static analysis significantly improves code quality without requiring additional testing resources. This publication is particularly valuable as an example of how source code analysis can be effectively adopted at industrial scale.

Study [3] explores the importance of static source code analysis from a security perspective. The authors emphasize that many common vulnerabilities, such as buffer overflows, SQL injections, XSS, and other standard security issues, can be detected at early development stages using specialized analyzers. Using tools like Fortify and Coverity as examples, the authors demonstrate the capability to automatically detect a wide range of security flaws without executing the code. The paper highlights that static analysis should be a systematic part of the secure development process, not a one-time testing effort. The importance of proper developer training and tool configuration for achieving effective results is also underlined. This work remains foundational in the field of secure programming and retains its relevance amid growing cyber threats.

Paper [4] presents an empirical study of bugs in modern open-source software. The authors analyzed bugs reported in the repositories of several major open-source projects, including Mozilla, Apache, and Eclipse, and classified them by type, origin, and consequences. It was found that most errors stem from human factors – incorrect assumptions, API changes, or complex component interactions. Special attention is given to the difficulty of identifying logical errors, which are not always caught by tests or compilers. The authors conclude that effective code quality control requires a combined strategy that includes both static and dynamic analysis, as well as active user feedback. This study is valuable for gaining a realistic understanding of the nature of software defects and identifying the most error-prone areas of code.

As a result of study [5], the VulLibMiner framework was developed, introducing a novel approach to the automated detection of vulnerable third-party Java libraries based solely on textual vulnerability descriptions. This is highly relevant in modern software development practice, where a significant portion of code depends on external libraries, often used without thorough security audits. The authors also discuss the future development prospects of the system, including its scalability to other programming languages, integration into IDEs, and automatic generation of recommendations for updating insecure libraries.

Publication [6] presents an innovative approach to code analysis using deep learning techniques. The study introduces the code2vec system, which transforms source code into vector representations, enabling the use of neural network models for tasks such as classification, recommendation, and bug prediction. The method is based on representing code snippets as paths in the abstract syntax tree, which are then fed into a neural network. As a result, the system can «understand» the structure of code and learning to recognize patterns associated with certain types of errors or stylistic deviations. code2vec exemplifies a new generation of code analysis tools that combine classical syntactic analysis methods with artificial intelligence capabilities. This work is of fundamental importance to the development of intelligent code analysis systems.

The reviewed publications demonstrate the high scientific and practical relevance of source code analysis methods as one of the key tools for ensuring software quality, security, and reliability. The research shows that static analysis is extremely effective for the early detection of syntactic, semantic, and logical errors – particularly at scale in corporate environments (e.g., Google and SAP) – and for identifying vulnerabilities before program execution. Industrial practice indicates that static analysis integrated into CI/CD pipelines significantly reduces technical debt and improves release quality.

Meanwhile, dynamic analysis is considered a complementary yet essential stage that enables the detection of issues related to performance, memory leaks, concurrency, and real-world execution behavior. Publications describing tools such as VulLibMiner highlight the growing importance of analyzing third-party libraries and dependencies, which constitute a critical part of the modern software landscape.

**The purpose of this work** is to investigate and critically analyze modern methods of source code analysis, including static, dynamic, and intelligent approaches, to evaluate their effectiveness, applicability at various stages of the software development lifecycle, and the potential for integrating machine learning tools to enhance the quality, security, and reliability of software code amid the increasing complexity of software systems.

## Main part

Source code analysis is a systematic process of examining the program text to identify syntactic, semantic, logical, and architectural errors, as well as to verify

compliance with programming standards, security requirements, and performance. This analysis is one of the fundamental stages of the software development lifecycle, as it allows minimizing risks associated with errors at later stages such as testing, deployment, or operation.

The source code, or source text of programs, serves as the main object of research. Unlike binary analysis, which works with executable files, source code analysis provides a deeper and more contextual understanding of the program's logic, structural features, component interconnections, and potential risk areas.

In modern software engineering, code analysis performs several important functions: quality assurance, security enhancement, standards compliance auditing, maintenance, and support. There are various methods of source code analysis, conventionally divided into static (performed without executing the program) and dynamic (requiring execution of the code or its parts in a controlled environment). Hybrid approaches that combine features of both types and intelligent methods based on machine learning algorithms [7] are also distinguished. Depending on the objective, analysis can be carried out at different levels: syntactic, semantic, structural, functional, and behavioral. Source code analysis is not only a technical process but also an integral part of development culture – a practice that allows creating reliable, maintainable, and secure software.

Methods of source code analysis are classified according to different criteria, particularly by processing method, environment type, software lifecycle phase, and degree of automation. The most fundamental and common classification is the distinction between static and dynamic analysis methods. Both approaches have their advantages, limitations, and application specifics.

Static analysis involves analyzing code without executing it. It is performed at the development or compilation stage and allows detecting syntactic, semantic, and structural errors. These methods are based on building syntax trees, function call graphs, and analyzing data and control flow. They are used to check compliance with coding standards, detect code duplication, incorrect constructions, “dead” code, or potentially unsafe operations. Examples of tools include SonarQube, ESLint, PVS-Studio, Coverity, and others. The advantages of static analysis include its ability to work without program execution and identify issues at early stages.

However, despite many advantages, static analysis has several limitations. Firstly, it cannot provide a complete check of the program's dynamic behavior. For example, it cannot detect memory leaks, race conditions, failures due to lack of resources, or other errors that manifest only during execution. In such cases, dynamic analysis methods are necessary.

Another limitation is the high level of false positives – situations where the analyzer reports an error that does not actually exist. This may reduce trust in the tool and lead to unnecessary time spent by developers. Some tools also have limited support for certain programming languages or do not consider the specifics of non-standard architectures, which reduces analysis accuracy.

It should also be noted that the effective use of static analyzers requires appropriate skills and configuration, as different projects may have their own stylistic, architectural, or domain-specific characteristics that need to be considered when setting up the analysis system.

Dynamic analysis, unlike static analysis, is performed during program execution. It allows examining the software's behavior in a real or simulated execution environment. Dynamic analysis includes profiling, tracing, memory usage monitoring, detection of memory leaks, incorrect variable access, performance checking, thread analysis, etc. This approach is necessary for detecting errors that cannot be identified statically, especially in multithreaded or event-driven systems. Examples include Valgrind, Intel VTune, AddressSanitizer, and IDE profilers. Its main advantage is analysis accuracy, but it requires time, a configured test environment, and coverage of real scenarios.

In addition to the basic classification, the following are also distinguished: hybrid methods combining the advantages of static and dynamic approaches to achieve higher accuracy; semantic analysis that examines the meaning and context of instructions and helps detect logic inconsistencies; formal analysis based on mathematical models to prove program correctness; intelligent methods using machine learning or deep learning algorithms for automated error pattern detection, code style analysis, or vulnerability prediction; dependency analysis that studies the use of third-party libraries and packages, particularly for known vulnerabilities or licensing incompatibility.

The disadvantages of dynamic source code analysis lie in a range of technical, methodological, and practical limitations that complicate its application or reduce its effectiveness under certain conditions (see Fig. 2). Dynamic analysis depends on which code fragment is executed during testing. If a specific branch of logic is not activated in the selected scenario, the related errors will remain undetected. That is, it does not guarantee complete verification unless all execution paths are covered.

Running a program with monitoring tools significantly increases CPU load, memory usage, and execution time. Some tools slow down program performance by tens of times (e.g., Valgrind), making them unsuitable for large or production-level systems. Performing dynamic analysis requires creating a test environment that simulates the system's operation under conditions close to real ones. This demands additional resources, configurations, interaction scenarios, and input/output data.

In large distributed or microservice systems, dynamic analysis may require simultaneous execution of many components, complicating automation –especially in cases of limited access to full infrastructure (e.g., cloud services or container clusters).

Dynamic tools do not always provide complete information about the source of an error, especially if it arises in a compiled module without access to the source code. This complicates further localization and elimination of the defect.

Additionally, effective dynamic analysis requires a set of realistic and well-designed test cases. If such tests are absent or of low quality, a significant portion of errors will remain unnoticed.

Dynamic analysis is an indispensable means of detecting behavioral, multithreading, and resource-related problems. However, it should not be used in isolation. Its limitations are compensated by combining it with static analysis methods, integration into CI/CD pipelines, and careful preparation of the test environment.

The classification of source code analysis methods reflects the diversity of technical tasks faced by developers and analysts and allows for selecting appropriate approaches depending on goals, development stage, and

software characteristics. Fig. 1 visualizes the key features of both methods according to main criteria and demonstrates that neither static nor dynamic analysis is self-sufficient; however, together, they form a powerful toolkit for deep diagnostics, quality control, and ensuring the security of software code.

Their integration into the software development lifecycle is critically important for modern software engineering.

Fig. 2 systematizes the typical errors identified by dynamic methods of software analysis, classifying them into three key aspects: the category of the issue, an example of the error and its consequences, and provides appropriate tools for detecting each type of defect.

Criterion	Static Analysis
Application phase	Before compilation or execution
Need for code execution	Not required
Error detection	Syntactic, logical, stylistic errors
Code coverage	Full (if whole project is analyzed)
Performance	Fast, efficient
Typical tools	SonarQube, ESLint, PVS-Studio, Coverity
Key advantages	Early detection, automation, CI integration
Main limitations	False positives, no runtime insight
Criterion	Dynamic Analysis
Application phase	During program execution
Need for code execution	Mandatory
Error detection	Runtime errors, memory leaks, race conditions
Code coverage	Limited to executed paths
Performance	May be slow, resource-intensive
Typical tools	Valgrind, Intel VTune, AddressSanitizer
Key advantages	Real behavior, precision, runtime defect detection
Main limitations	Requires environment, partial coverage

Fig. 1. Comparative analysis of static and dynamic methods of source code analysis

Problem Category	Example Error
Memory leak	Unreleased malloc/new
Invalid access	Array out-of-bounds, null pointer dereference
Race conditions	Concurrent access to shared variable
Deadlock	Thread blocking on competing resources
Resource issues	Unclosed file descriptors, sockets
Low performance	Slow loops, frequent I/O calls
Problem Category	Consequences
Memory leak	Resource consumption growth, crashes
Invalid access	Crashes, logic violations
Race conditions	Unpredictable behavior
Deadlock	Hanging or halted execution
Resource issues	Resource exhaustion, OS errors
Low performance	Performance degradation, latency
Problem Category	Tools
Memory leak	Valgrind, Dr. Memory
Invalid access	AddressSanitizer
Race conditions	ThreadSanitizer, Helgrind
Deadlock	Intel Inspector
Resource issues	strace, lsof
Low performance	VTune Profiler, perf

Fig. 2. Typical Issues in Dynamic Analysis

Dynamic analysis is a critically important stage in ensuring software quality, particularly for detecting errors that cannot be identified through static analysis. Without its implementation, it is impossible to guarantee the performance, stability, or security of complex systems. Therefore, the competent use of dynamic tools,

aligned with the types of potential errors, is an essential component of the modern development process.

The ideal strategy involves the sequential application of both approaches. In the early stages of the software life cycle, static analysis is employed to quickly and cost-effectively identify syntactic, stylistic, and logical

errors, violations of coding standards, and potential vulnerabilities. This stage is particularly effective when integrated into continuous integration (CI) systems, enabling code quality control during development. After development and compilation are completed – or in parallel – dynamic analysis is introduced. It focuses on testing the software's behavior in real-world conditions, identifying resource interaction issues, analyzing multithreading, performance, and overall system stability.

A comparative analysis of the effectiveness of these approaches demonstrates that their combination leads to significantly better results in reducing software defects than relying on either approach alone. For instance, static analyzers can successfully detect up to 70–80% of defects at early development stages, whereas dynamic methods are effective in identifying issues that are not reflected in the code's structure but cause failures during execution. Thus, the integrated use of both methods provides more reliable protection against critical errors and substantially reduces risks during software operation.

Innovative techniques are also used in formal validation analysis. For example, systems trained on thousands of known vulnerabilities can predict the appearance of similar defects in new projects based on architectural or API-call similarities. These models can identify zero-day vulnerabilities even before they are exploited.

Intelligent code analysis offers several advantages: it operates in real-time, learns from new examples, adapts to a team's coding style, and can be integrated into IDEs or CI/CD systems. However, these methods require high-quality training datasets, substantial computational resources, and proper model configuration – factors that may limit their use in small teams or constrained environments.

Despite these limitations, the rapid development of AI-based tools indicates that intelligent methods are poised to become the foundation of a new generation of code analysis systems – adaptive, context-aware, and self-learning. This evolution will not only improve the efficiency of error detection but also make software development more secure, stable, and predictable. Therefore, the integration of AI into source code analysis is not merely a technical innovation but a strategic necessity for the future of software engineering.

## Conclusions

As a result of the conducted research, a systematic analysis was carried out on the main methods used for

examining the source code of software, aimed at detecting errors, vulnerabilities, violations of coding standards, and ensuring the overall quality and security of the software product. The key characteristics, advantages, and limitations of both static and dynamic analysis were reviewed, along with the prospects for the development of intelligent methods based on machine learning algorithms.

The comparative study showed that static analysis is effective during the early stages of development when the program has not yet been executed. It enables the detection of syntactic and logical errors, coding style violations, code duplication, and potential security threats that are independent of the execution context. At the same time, dynamic analysis demonstrates its effectiveness in scenarios where it is necessary to evaluate the program's behavior in a real runtime environment. It can detect memory leaks, race conditions, thread blocking, resource issues, and performance problems – i.e., aspects that static analysis does not cover.

It is worth noting that the combined use of static and dynamic analysis represents the most effective approach, as it ensures comprehensive coverage of potential issues in the code and allows for enhanced software stability and quality. The integration of both approaches into the development process, particularly within CI/CD pipelines, is a practice that is increasingly being adopted across the industry.

Special attention was given to innovative source code analysis methods involving artificial intelligence. Modern deep learning-based systems such as code2vec, VulLibMiner, and others demonstrate significant potential in improving defect detection and vulnerability prediction before they occur. These approaches enable substantial automation of the analysis process, adaptation to team-specific coding styles, and reduced workload for developers.

Therefore, the research confirms that the use of source code analysis methods is a necessary condition for the development of high-quality, secure, and maintainable software. The implementation of analytical tools within the development process promotes a higher coding culture, reduces the number of critical errors, and lays the foundation for a long software product lifecycle. The further development of the field will undoubtedly be linked to the growing role of artificial intelligence, the improvement of automated verification tools, and the adoption of hybrid analysis strategies that encompass both syntactic and behavioral aspects of code.

## REFERENCES

1. C. Sadowski, J. van Gogh, Jaspan C., E. Söderberg, C. Winter. Tricorder: Building a program analysis ecosystem. ICSE '15: Proceedings of the 37th International Conference on Software Engineering, vol., 2015. P. 598-608. <https://doi.org/10.1109/ICSE.2015.76>.
2. Ayewah N., Pugh W. The Google FindBugs fixit. ISSTA '10: Proceedings of the 19th international symposium on Software testing and analysis, 2010. P. 241-252. <https://doi.org/10.1145/1831708.1831738>.
3. B. Chess, G. McGraw. Static Analysis for Security. IEEE Security & Privacy, vol. 2, No. 6, 2004. P. 76-79. <https://doi.org/10.1109/MSP.2004.111>.
4. Z. Li, L. Tan, Y. Wang, S. Lu, Y. Zhou, C. Zhai. Have Things Changed Now? An Empirical Study of Bug Characteristics in Modern Open Source Software. Proceedings of the 1st Workshop on Architectural and System Support for Improving Software Dependability, ASID 2006, San Jose, California, USA, October 21, 2006. 9 p. <https://doi.org/10.1145/1181309.1181314>.

5. T. Chen, L. Li, B. Shan, G. Liang, D. Li, Q. Wang, T. Xie. Identifying Vulnerable Third-Party Java Libraries from Textual Descriptions of Vulnerabilities and Libraries. Cornell University. Computer Science. Cryptography and Security, 2023. 23 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.08206>.
6. Uri Alon, Meital Zilberstein, Omer Levy, Eran Yahav. code2vec: Learning Distributed Representations of Code. Cornell University. Computer Science. Machine Learning, 2018. 23 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.09473>.
7. Flach P. A. Machine Learning: The Art and Science of Algorithms that Makes Sense of Data. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 291 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511973000>.

Received (Надійшла) 02.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.08.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Кужель Сергій Ігорович** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Serhii Kuzhel** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [serhii.kuzhel@nure.ua](mailto:serhii.kuzhel@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0001-7778-4881>.

**Литвинов Андрій Павлович** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Andrii Lytvynov** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [andrii.lytvynov1@nure.ua](mailto:andrii.lytvynov1@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0008-1254-1513>.

**Плехов Олександр Вікторович** – магістрант, кафедра органічного синтезу, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна;

**Oleksandr Plekhov** – master, Department of Organic Synthesis, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [aleks.plekhov@gmail.com](mailto:aleks.plekhov@gmail.com); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0000-1343-4308>.

## Методи аналізу вихідних текстів програм

С. І. Кужель, А. П. Литвинов, О. В. Плехов

**Анотація. Актуальність.** Актуальність дослідження методів аналізу вихідних текстів програм зумовлена низкою сучасних тенденцій у сфері програмної інженерії. З одного боку, зростає складність і масштаби програмних рішень, що обумовлює необхідність підвищення якості та стабільності програмного забезпечення. З іншого боку, зростає частота кіберзагроз, що змушує особливу увагу приділяти безпеці програмного коду. Сучасні програмні системи задіяні у критичних сферах: фінансових операціях, охороні здоров'я, автоматизації виробництва, управлінні інфраструктурою тощо. Помилки і недоліки в таких системах можуть мати серйозні наслідки, що призводять до великих економічних втрат, збоїв у роботі критичних служб і навіть створюють загрозу життю людей. В умовах посилення конкуренції та стрімкої цифровізації якість програмного забезпечення стає визначальним фактором успіху компаній на ринку. Впровадження ефективних методів аналізу вихідних текстів програм стає необхідністю не лише для великих підприємств, але й для малих і середніх компаній, що прагнуть створювати надійне та безпечне програмне забезпечення. Особливо варто підкреслити перспективність інтеграції сучасних технологій штучного інтелекту та машинного навчання у процес аналізу коду. Такі підходи дозволяють здійснювати автоматичний пошук і класифікацію помилок, що значно скорочує витрати часу на їх виявлення і усунення, а також підвищує точність та ефективність аналізу. Таким чином, розвиток та поглиблення досліджень у сфері методів аналізу вихідних текстів програм є важливим завданням сучасної програмної інженерії, що дозволяє вирішувати актуальні проблеми забезпечення якості та безпеки програмних систем. **Об'єкт дослідження:** вихідні тексти програмного забезпечення як структура, що підлягає формальному, семантичному та поведінковому аналізу з метою виявлення помилок, вразливостей, недоліків архітектури та порушень стандартів кодування. **Мета статті:** дослідження існуючих методів аналізу вихідних текстів програм, зокрема статичних і динамічних підходів, їх інструментального забезпечення та перспектив застосування сучасних технологій, зокрема штучного інтелекту, для підвищення ефективності виявлення помилок, забезпечення якості, надійності та безпеки програмного коду на всіх етапах життєвого циклу розробки програмного забезпечення. **Результати дослідження.** Систематизовано класифікацію методів аналізу вихідного коду програмного забезпечення, зокрема статичних, динамічних, гібридних та інтелектуальних. Проведено порівняльний аналіз статичного та динамічного підходів за ключовими критеріями: ефективність, охоплення помилок, ресурсомісткість та застосовність на різних етапах життєвого циклу ПЗ. Визначено типові категорії помилок, які виявляються динамічними методами: витоки пам'яті, помилки доступу до ресурсів та проблеми продуктивності. Проаналізовано можливості використання інтелектуальних інструментів, зокрема нейромережевих моделей (code2vec, VulLibMiner), для автоматизованого аналізу та прогнозування вразливостей. Обґрунтовано доцільність комплексного підходу, що поєднує статичний і динамічний аналіз, як найбільш ефективну стратегію забезпечення якості та безпеки програмного забезпечення. **Висновки.** Статичний аналіз ефективний для раннього виявлення помилок і відповідності коду стандартам. Динамічний аналіз необхідний для виявлення помилок для виконання, таких як витоки пам'яті та умови гонки. Жоден метод не є універсальним. Найкращі результати дає їх поєднання. Інтелектуальні підходи (AI/ML) значно підвищують автоматизацію та точність аналізу. Комплексне впровадження аналізу коду сприяє створенню безпечного, якісного та підтримуваного ПЗ.

**Ключові слова:** аналіз вихідного коду, статичний аналіз, динамічний аналіз, помилки в програмному забезпеченні, безпека коду, якість програмного забезпечення, інструменти аналізу, штучний інтелект, машинне навчання, автоматизована перевірка, code2vec, VulLibMiner, CI/CD.

Г. А. Кучук<sup>1,2</sup>, Д. О. Лисиця<sup>1</sup>, Д. М. Ірха<sup>2</sup>, Д. В. Кириленко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

<sup>2</sup>Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

## МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО РОЗТАШУВАННЯ ОБ’ЄКТІВ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

**Анотація.** Об’єктом дослідження є процес розстановки об’єктів доповненої реальності у фізичному просторі, який обмежений у розмірах. **Предметом дослідження** є алгоритми оптимального розташування об’єктів доповненої реальності у фізичному просторі кінцевих розмірів. **Мета статті** полягає у розробці методу оптимального розташування об’єктів доповненої реальності. Отримано наступні **результати**. Визначений підхід до формування оптимальної перцептивної відстані. Розроблена математична модель, що дозволяє визначити кількісні показники двох основних критеріїв оптимальності. Запропонований підхід до визначення відстані між об’єктами AR та границями реальної площини. На цьому підході базується запропонований алгоритм оптимального розташування об’єктів доповненої реальності. **Висновки.** Запропонований метод оптимального розташування об’єктів AR, що складається з математичної моделі, визначення відстаней до границь площини реального об’єкту та відповідного алгоритму. Метод дозволяє варіювати змінами віртуального об’єкту у реальному часі.

**Ключові слова:** комп’ютерна система, доповнена реальність, віртуальний об’єкт, площина реального об’єкту.

### Вступ

У світі спостерігається значне зростання обсягу інформації, що генерується та споживається щодня [1]. В результаті зростає потреба у більш ефективних способах обробки та візуалізації цієї інформації. Доповнена реальність (AR) – перспективна технологія, яка може допомогти вирішити цю проблему, забезпечуючи більш інтуїтивний та зручний спосіб візуалізації даних [2, 3]. Однак процес розміщення віртуальних об’єктів в оточенні користувача за допомогою AR-програм може бути пов’язаний з деякими труднощами. Одна з проблем, з якою стикаються користувачі, пов’язана з розміщенням віртуальних об’єктів у своєму оточенні [4]. Важливим моментом є необхідність забезпечити користувачам безпечний та природно-інтуїтивний досвід взаємодії з віртуальними об’єктами [5]. Це досягається за рахунок достатнього простору навколо віртуальних об’єктів, щоб користувачі могли наблизитися до них та взаємодіяти з ними з усіх боків без ризику зіткнення з реальними об’єктами чи іншими користувачами [6, 7].

Однак на сьогоднішній час існує обмежене кількість досліджень, вивчаючих і оцінюють різні методи і рішення для такого розміщення для внутрішньої та зовнішньої середовища [8–11].

Наприклад, в роботі [8] обговорюються останні дослідження методів розміщення 3D-моделей в AR. Стаття починається з огляду методів розміщення AR і рішень, запропонованих в літературі. Потім описується підхід до оцінки, який включає як якісну, так і кількісну оцінку кількох методів розміщення AR для внутрішньої і зовнішньої середовища. Автори даної статті пропонують кількісну і якісну оцінку кількох методів розміщення AR на 3D моделі. Вони також наводять обговорення вимог до точності і стабільності розміщення в деяких випадках використання в області АЕСО, аналізуючи придатність використання кожного вивченого методу розміщення. Для порівняння точності кожного методу розміщення були визначено локальні відхилення координат між реальними

точками об’єкта і їх кореспондентами. У дослідженні [9] вивчаються проблеми віддаленого співробітництва з використанням дисплеїв доповненою реальністю. Автори зазначають, що однієї з основних проблем при віддаленому взаємодії з використанням AR-дисплеїв є позиціонування віртуальних об’єктів. Автори також визначили проблемні ситуації, характерні для конкретної завдання, і запропонували рекомендації по розробці розподілених AR для полегшення позиціонування віртуальних об’єктів.

Необхідність оптимального розташування в AR-застосунках обумовлена декількома факторами, включаючи зручність і безпека користувача, реалістичність і занурення, інтерактивність, продуктивність і ефективність, а також конкретні цілі програми. Досягнення оптимального розташування включає в себе подолання кількох проблем, таких як підтримка реалізму і узгодженості, забезпечення комфортного користувальницького досвіду, полегшення інтерактивності і оптимізація продуктивності. Отже, науково-технічне завдання оптимального розташування віртуальних об’єктів у системах комп’ютерного зору є актуальним. **Об’єктом дослідження** є процес розстановки об’єктів доповненої реальності у фізичному просторі, який обмежений у розмірах. **Предметом дослідження** є алгоритми оптимального розташування об’єктів доповненої реальності у фізичному просторі кінцевих розмірів. **Мета статті** полягає у розробці методу оптимального розташування об’єктів доповненої реальності.

### Оптимальна перцептивна відстань

У доповненій реальності центральна увага приділяється не тільки розташуванню об’єктів щодо користувача, але й їх взаємному становищу в просторі. Це забезпечує гармонійне поєднання віртуальних елементів з реальним світом, виключаючи візуальне перекриття і підтримуючи цілісність сприйняття. Під зоною просторової нейтральності розуміється буферне простір, мінімізуюче ризик накладення віртуальних і фізичних об’єктів. Ця концепція сприяє утриманню

віртуальних об'єктів в межах безпечного і видимого простору, уникаючи створення ситуацій, які можуть порушити плавність і реалізм AR-досвіду. Цей принцип спрямований на визначення ідеального проміжку між об'єктами, щоб максимізувати зручність сприйняття і інтерактивність. Ця відстань варіюється в залежності від контексту використання та характеристик віртуальних об'єктів, забезпечуючи кожному елементу достатньо місця для взаємодії без ризику конфлікту або дискомфорту. Просторова узгодженість сприйняття підкреслює важливість відповідності між віртуальними і реальними об'єктами для створення однамітного сприйняття простору. Дана узгодженість може бути кількісно визначена через оптимальну перцептивну відстань, яка передбачає оптимальну відстань чи розташування віртуальних об'єктів щодо користувача і інших об'єктів в фізичному просторі, що забезпечує найкраще сприйняття та взаємодію без виклику дискомфорту, порушення ілюзії присутності або візуального навантаження. Розробка ефективного AR-досвіду вимагає інтеграції цих принципів: врахування просторового розмежування і оптимального розташування об'єктів. Такий підхід дозволяє створювати інтуїтивно зрозумілі, безпечні і візуально привабливі віртуальні середовища, сприяючи природному взаємодії користувача з доповненою реальністю.

Для досягнення найкращого користувацького досвіду у доповненій реальності критично важливо забезпечити оптимальну відстань між віртуальними об'єктами і користувачем. Це відстань повинна бути визначена таким чином, щоб максимізувати зручність сприйняття і мінімізувати потенційний дискомфорт. У доповнення до цього необхідно забезпечити просторову узгодженість сприйняття, гарантуючи, що віртуальні об'єкти гармонійно інтегруються в реальне оточення, зміцнюючи тим самим загальне враження від присутності в доповненій реальності. Використання цих принципів в сукупності дозволяє створити ефективні і естетично приємні AR-сценарії, покращену взаємодію користувача з віртуальними елементами. Для побудови математичної моделі пропонується прийняти нижчезазначені необхідні фактори для віртуально розташованих об'єктів:

- тривимірні лінійні розміри (довжина, ширина, висота);

- зона просторової нейтральності навколо об'єкту, сприятлива позитивному досвіду взаємодії користувача з об'єктом.

У процесі розробки застосунку доповненої реальності розробник часто візуалізує сценарій використання, в якому віртуальний об'єкт позиціонується на горизонтальному поверхні, такий як стіл або підлогу. Щоб забезпечити безперервне взаємодія з користувачем, критично важливо, щоб доступ до цього об'єкту був забезпечений з передньої сторони. Ідеально, якби користувачі мали можливість оглядати об'єкт з різних точок зору, включаючи вид зверху. Для структурованого опису характеристик об'єкта та гарантії його комплексного сприйняття була розроблена програмна модель, детально відбиваюча ці атрибути.

Для забезпечення користувачів ефективними підказками і рекомендаціями по організації віртуальної

сцени в інтерфейсі, критично важливо провести аналіз даних, що надходять від датчиків мобільного пристрою, про віртуальні площини. Ці дані слід зіставити з габаритами об'єктів доповненої реальності і асоційованими з ними буферними зонами за низкою критеріїв.

Перший критерій, що позначається як  $K_1$ , визначає попередні умови для розміщення віртуального об'єкта. Він є необхідною умовою для виконання наступного завдання оптимізації розміщення. Для того щоб установка об'єкта була можлива, лінійні розміри доступного фізичного простору повинні перевищувати або дорівнювати розмірам об'єкта, що розміщується. Ця попередня умова може бути сформульована через такі співвідношення для кожної з осей:

$$K_{1X} = \frac{X_0}{X_P} \leq 1; \quad K_{1Y} = \frac{Y_0}{Y_P} \leq 1; \quad K_{1Z} = \frac{Z_0}{Z_P} \leq 1, \quad (1)$$

де  $X_0$  та  $Z_0$  представляють лінійні розміри (ширину та глибину відповідно) віртуального об'єкта;  $X_P$  та  $Z_P$  є лінійними розмірами (шириною та глибиною, відповідно) доступної площини у просторі;  $Y_0$  позначає лінійний розмір висоти об'єкта, а  $Y_P$  представляє доступну висоту у фізичному просторі.

Другий критерій, що позначається як  $K_2$  є критерієм оптимальності, який оцінює, наскільки обсяг вільного простору навколо віртуального об'єкта відповідає встановленому розробником параметру просторової нейтральності. Для наочності розглянемо формування критерію  $K_2$  на прикладі осі  $X$  (з аналогічним застосуванням до інших осей). Відстань до об'єкта, віднормована на зону просторової нейтральності, називатимемо перцептивною відстанню. Тоді перцептивна відстань  $K$  у правій частині заданого макету об'єкта може бути визначена таким чином:

$$K_+(X_+, D_+) = \begin{cases} X_+/D_+, & \text{якщо } X_+ < D_+; \\ 1, & \text{якщо } X_+ \geq D_+, \end{cases} \quad (2)$$

де  $X_+$  є фактичною відстанню по осі  $x$  від краю об'єкта до правого краю площини сканування, а  $D_+$  позначає задану буферну відстань для досліджуваного об'єкта. Перцептивна відстань з лівого боку може бути визначена аналогічним чином:

$$K_-(X_-, D_-) = \begin{cases} X_-/D_-, & \text{якщо } X_- < D_-; \\ 1, & \text{якщо } X_- \geq D_-, \end{cases} \quad (3)$$

Ідеальна перцептивна відстань по осі  $X$  може бути досягнута, якщо виконується така умова;

$$K_-(X_-, D_-) = K_+(X_+, D_+) = 1, \quad (4)$$

хоча це не завжди можливо.

Якщо виконано умову

$$X_P - D_+ - D_- < X_0 < X_P, \quad (5)$$

то розмір об'єкта менше розміру області, в яку цей об'єкт вбудовується, але разом з обома зонами комфорту він туди вже не поміщається.

Для досягнення збалансованої взаємодії та виключення ситуацій, коли збільшення відстані, з одного боку, призводить до зменшення його з протилежної, введемо таку цільову функцію:

$$K_2 = (K_- - K_+)^2. \quad (6)$$

Оптимальним вважається таке розміщення, яке мінімізує цю функцію. Очевидно, що мінімум  $K_2$  досягається при виконанні такої умови:

$$K_- = K_+ \quad (7)$$

Це співвідношення є критерієм оптимальності. Перцептивні відстані  $K_-$  і  $K_+$ , що задовольняють рівнянню (7), є оптимальними перцептивними відстанями (ОПВ).

Нехай  $X_P$  – лінійний розмір доступного вільного простору,  $X_O$  – лінійний розмір об'єкта вздовж обраної осі,  $L-l$  – довжина вільного простору. Тоді із критерію оптимальності (7) можна розрахувати оптимальне розміщення об'єкта по даній осі:

$$X_- = (L-l) \cdot (D_+ / (D_+ + D_-)); \quad (3.8)$$

$$X_+ = L - X_- = (L-l) \cdot (D_- / (D_+ + D_-)). \quad (3.9)$$

Аналогічний розрахунок виконується для кожного вектора ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) у додатному (+) та від'ємному (-) напрямках.

### Визначення відстані між об'єктами AR та границями реальної площини

Модель оптимального позиціонування об'єктів доповненої реальності включає різноманітні параметри, які виступають в якості показників адекватності поточного місця розташування для віртуального контенту з урахуванням просторової узгодженості. Місце розташування вважається ідеальним, коли границі об'єкта доповненої реальності, включаючи його буферну зону, повністю укладаються в границі просторової області. Модель, що описується, застосовує математичні методи для оцінки розмірів просторової зони, лінійних габаритів віртуального об'єкта та обсягу вільного простору навколо нього. AR-застосунок, інтегрований з фізичним двигуном, задіює ці розрахунки для знаходження балансу між вимогами просторової гармонії та обмеженнями реального світу. Основне завдання – розробити AR-взаємодію, що максимізує ефективність розміщення віртуальних елементів доповненої реальності у користувача. Це припущення веде до певної обчислювальної задачі: визначення простору між віртуальним об'єктом з огляду на його просторово-нейтральні зони та края сканованої віртуальної площини, на якій здійснюється розміщення. Для цього потрібно активувати основні функції фізичних движків, що використовуються у розробці застосунків доповненої реальності.

Віртуальні об'єкти та процес сканування площини працюють у межах тривимірного простору. Ці об'єкти пропонують потенціал для отримання та аналізу геометричних даних, безцінного ресурсу в області AR. Такі геометричні дані дозволяють створити складну сітку, взаємозалежну структурну мережу, яка визначає форму об'єкта.

Архітектура сітки в основному складається з двох фундаментальних елементів: вершин, або наріжних точок у тривимірному просторі, та трикутників

- геометричних одиниць, породжених взаємозв'язками вершин. Кожна вершина пов'язана з окремим індексом, числовим ідентифікатором, що ефективно відображає геометрію об'єкта. Трикутники, з іншого боку, виникають із зв'язків між цими індексованими вершинами. Вони в сукупності створюють видиму поверхню 3D-об'єкта, сприяючи сприйняттю масивності та форми віртуального об'єкта.

Особливу увагу слід приділяти складній геометрії віртуальних площин, створених бібліотекою AR без маркерів. У якості інструментів для аналізу обрані бібліотека ARKit і її оболонка ARFoundation. ARKit славиться своїми потужними можливостями по створенню AR- середовища, а ARFoundation виступає в якості універсального API, спрощуючи розробку AR, надаючи загальну основу для множини AR-платформ. При використанні з ігровим двигуном Unity, відомим своїм універсальним і повним набором інструментів для створення інтерактивного 3D контенту, ці ресурси утворюють тріаду для розробки AR-застосунків.

Опишемо підхід до визначення відстані. Один з можливих підходів полягає в визначенні точок перетину перпендикулярів, проведених з центру обмежувачого паралелепіпеда по координатних осях, з гранями площини сканування. Такий має низку переваг. Головною з них є його простота, що зводить завдання до елементарного геометричного завдання, яке робить обчислення менше складними. Крім того, простота алгоритму дозволяє швидко його реалізувати, що дуже цінується в бізнес-застосунках, де швидкість і ефективність часто схиляють чашу ваг на користь прийняття рішення.

Тим не менше основний недолік такого підходу полягає в недостатній точності розрахунків при застосуванні до приміщень неправильної форми і сканованих ніш. Для поверхонь складної форми розрахунки відстані, як правило, не дозволяють точно виміряти просторове положення об'єкта відносно заданої поверхні. Тим не менше важливо відзначити, що частіше всього користувачі стикаються з прямокутними областями, для яких геометричний підхід надає точні значення відстані. Тому в рамках даного підходу до визначення відстані можна не звертати уваги на нестандартні поверхні. Пріоритет швидкості і простоти реалізації виправдовує цей компроміс, визнаючи, що в практичних застосунках ефективність часто перевершує ідеальну точність.

### Алгоритм оптимального розташування об'єктів доповненої реальності

Алгоритм, використовуваний для систематичного розташування об'єкта доповненої реальності, в першу чергу заснований на безперервній оцінці відсканованого простору і наступному порівнянні його параметрів із заданими атрибутами віртуального об'єкта.

Послідовність дій при застосуванні даного алгоритму наведена на рис. 1.

Отримані значення коефіцієнтів служать цінними індикаторами, які можуть бути використані для візуалізації підказок у користувальницькому інтерфейсі та для регулювання розміщення сцени AR.

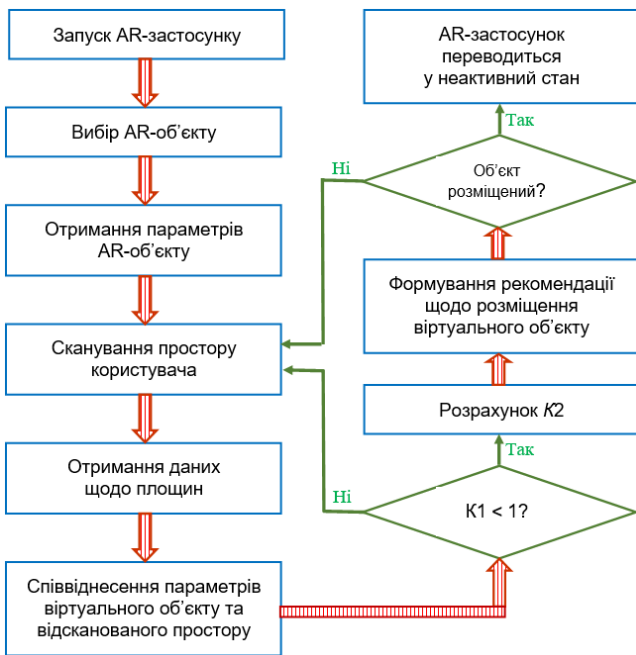


Рис. 1. Послідовність дій при використанні алгоритму розташування об'єкта доповненої реальності

Завдяки такому систематичному підходу користувачі отримують візуальне подання о просторової придатності для розміщення об'єкта, що покращує їх розуміння планування віртуальною сцени. Використовуючи оцінку алгоритмом відсканованого простору і порівняння зі властивостями віртуального об'єкта, можна досягти більше інтуїтивного і оптимізованого сприйняття доповненою реальності.

Кожен віртуальний об'єкт характеризується своїми габаритами і вимагає виділення навколо себе просторово-нейтральної зони. Ця зона виконує дві ключові функції: по-перше, вона гарантує наявність достатнього простору для того, щоб користувачі могли вільно підходити до віртуальних об'єктів і взаємодіяти з ними. По-друге, вона перешкоджає перекриттю віртуальних об'єктів між собою, підтримуючи таким чином безперервність і реалістичність сприйняття, що є критично важливим для ефективного застосування застосунків доповненої реальності.

Алгоритм, описаний далі, є узагальненням на двовимірний випадок одновимірного алгоритму розташування об'єктів. Попередній алгоритм чудово справляється з вибудовуванням об'єктів по заданій лінії в просторі, беручи до уваги як розміри, і необхідні вільну зону навколо. Однак йому не вистачає можливості заповнювати об'єктами весь доступний двовимірний простір, адже об'єкти можуть розташовуватися не тільки ліворуч і праворуч, але й далі або ближче до користувача. Новий алгоритм усуває цей недолік.

На початковому етапі роботи алгоритму в лівому нижньому кутку кожного об'єкта визначається точка прив'язки. Ця точка має першорядне значення, так як вона визначає координати розташування об'єкту. Після цього всі об'єкти упорядковуються у спадаючу послідовність в залежності від їх сумарної довжини вздовж осі Z в сукупності з розмірами вільних зон цього ж вектору, тобто в даному випадку фронтальна та задня зони просторової узгодженості.

Потім формується партія з кількох об'єктів. Формування цієї партії регулюється певним правилом. Як тільки загальна ширина вздовж осі X цих об'єктів - ця ширина включає в себе як їх лінійні розміри, так і розміри буферних зон вздовж горизонтальною осі - починає перевищувати задану ширину простору, призначеного для розміщення об'єктів, додавання нових об'єктів в партію припиняється.

У цей момент запускається алгоритм лінійного розміщення, який застосовується до всіх об'єктів в партії. Результатом цієї процедури є розташування об'єктів на першій лінії вздовж осі X. При такому розміщенні горизонтальний проміжок між об'єктами визначається параметром перцептивної відстані K. Цей параметр підтримується однаковим і постійним для всіх об'єктів, упорядкованих в лінію. Потім процес розміщення вздовж осі Z ініціюється від верхнього краю площини. За допомогою базової математичної операції – множення K на величину передньої дельта-відстані (позначається як  $Z^+$ ) – встановлюється величина відступу кожного об'єкта від верхньої границі площини. Потім з решти об'єктів збирається інша партія, і для цих об'єктів повторюється процес розрахунку горизонтального проміжного відстані.

Після цього розраховується зміщення по осі Z щодо положення об'єктів в попередній лінії. Цей процес розрахунку складається з кількох етапів. По-перше, вибирається максимальний коефіцієнт K між поточною і попередньою рядком. По-друге, для кожного об'єкта в поточному ряду визначаються потенційні верхні сусіди з попереднього ряду, то є об'єкти, мають загальні області вздовж координати X. Зрештою, обчислюється підсумкове зміщення по вертикалі. При цьому приймається до уваги не тільки передня зона буферного відстані поточного об'єкта, але і нижня зона оптимального відстані об'єкта, розташованого вище, якщо такий є. Алгоритм продовжує цикл до тих пір, поки не буде досягнуто позиціонування всіх об'єктів. Важливо додати, що алгоритм обробляє об'єкти зліва праворуч для всіх ліній з непарними номерами і справа наліво для всіх ліній з парними номерами. Даний підхід дозволяє більше рівномірно розподіляти об'єкти по їх габаритів, комбінуючи більше великі з більше дрібними. Описувана циклічна операція забезпечує щодо просте у реалізації і високопродуктивне розташування віртуальних об'єктів, при забезпечуючи комфорт користувача та ефективне використання простору.

## Висновки

Визначений підхід до формування оптимальної перцептивної відстані. Розроблена математична модель, що дозволяє визначити кількісні показники двох основних критеріїв оптимальності. Запропонований підхід до визначення відстані між об'єктами AR та границями реальної площини. На цьому підході базується запропонований алгоритм оптимального розташування об'єктів доповненої реальності. Запропонований метод оптимального розташування об'єктів AR, що складається з математичної моделі, визначення відстаней до границь площини реального об'єкту та відповідного алгоритму. Метод дозволяє варіювати змінами віртуального об'єкту у реальному часі.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kuchuk, H. and Malokhvii, E. (2024), "Integration of iot with Cloud, Fog and Edge computing: a review", *Advanced Information Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 65–78, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.2.08>
2. Criollo-C Santiago, Guerrero-Arias Andrea, Guana-Moya ~ Javier, Samala Agariadne, Lujan-Mora ´ Sergio. Towards sustainable education with the use of mobile augmented reality in early childhood and primary education: a systematic mapping. *Sustainability* 2024;16(3):1192. <https://doi.org/10.3390/su16031192>
3. Kuchuk, N., Kashkevich, S., Radchenko, V., Andrusenko, Y. and Kuchuk, H. (2024), "Applying edge computing in the execution IoT operative transactions", *Advanced Information Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 49–59, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.4.07>
4. Atwood-Blaine D, Huffman D. Mobile gaming and student interactions in a science center: the future of gaming in science education'. *Int J Sci Math Educ* 2017;15:45–65. <https://doi.org/10.1007/s10763-017-9801-y>
5. Alvarez-Marin Alejandro, Velazquez-Iturbide JAngel. Augmented reality and engineering education: a systematic review. *IEEE Trans Learn Technol* 2021;14 (6):817–31. <https://doi.org/10.1109/TLT.2022.3144356>
6. Aivelo T, Uitto A. Digital gaming for evolutionary biology learning: the case study of parasite race, an augmented reality location-based game. *LUMAT* 2016;4(1): 1–26. <https://doi.org/10.31129/LUMAT.4.1.3>
7. Ruban, I., Kuchuk, H., Kovalenko, A., Lukova-Chuiko, N. and Martovytsky, V. (2021), "Method for Determining the Structural Reliability of a Network Based on a Hyperconverged Architecture", *Studies in Computational Intelligence*, vol. 976, pp. 147–163, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-74556-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-74556-1_9)
8. El Barhoumi N., Hajji R., Bouali Z., Ben Brahim Y., Kharroubi A. (2022), "Assessment of 3D Models Placement Methods in Augmented Reality", *Applied Sciences*, 12 (20), pp. 106–120, doi: <https://doi.org/10.3390/app122010620>
9. Müller J., Butscher S., Feyer S. P. and Reiterer H. (2017), "Studying collaborative object positioning in distributed augmented realities", *The 16th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, Stuttgart Germany, ACM, pp. 123–132, doi: <https://doi.org/10.1145/3152832.3152856>
10. Kyza EA, Georgiou Y. Scaffolding augmented reality inquiry learning: the design and investigation of the Trace Readers location-based, AR platform. *Interact Learn Env* 2019;27(2):211–25. <https://doi.org/10.1080/10494820.2018.1458039>
11. Laato, Samuli, Heinrich Sobke, " and Manuel F. Baer. 2024. 'Augmented Future: tracing the trajectory of location-based Augmented reality gaming for the next ten years'. *23(2)*:189–203. doi: <https://doi.org/10.1515/icom-2024-0018>

Received (Надійшла) 07.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.08.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Кучук Георгій Анатолійович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

**Heorhii Kuchuk** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [kuchuk56@ukr.net](mailto:kuchuk56@ukr.net); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-2862-438X>;

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57057781300>.

**Лисиця Дмитро Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

**Dmytro Lysytsia** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [Dmytro.Lysytsia@khp.edu.ua](mailto:Dmytro.Lysytsia@khp.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-1778-4676>;

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57220049627>.

**Ірха Дмитро Максимович** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Dmytro Irkha** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine;

e-mail [Dmytro\\_Irkha@nure.ua](mailto:Dmytro_Irkha@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0001-5997-1704>.

**Кириленко Дмитро Володимирович** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Dmytro Kyrylenko** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine;

e-mail [Dmytro\\_Kyrylenko@nure.ua](mailto:Dmytro_Kyrylenko@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0001-5902-9794>.

**Method of optimal location of augmented reality objects**

Heorhii Kuchuk, Dmytro Lysytsia, Dmytro Irkha, Dmytro Kyrylenko

**Abstract.** The object of the study is the process of arranging augmented reality objects in physical space, which is limited in size. The subject of the study is algorithms for the optimal arrangement of augmented reality objects in physical space of finite size. The purpose of the article is to develop a method for the optimal arrangement of augmented reality objects. The following results were obtained. An approach to the formation of the optimal perceptual distance is determined. A mathematical model is developed that allows you to determine the quantitative indicators of two main optimality criteria. An approach to determining the distance between AR objects and the boundaries of the real plane is proposed. The proposed algorithm for the optimal arrangement of augmented reality objects is based on this approach. **Conclusions.** A method for the optimal arrangement of AR objects is proposed, consisting of a mathematical model, determination of distances to the boundaries of the plane of the real object and the corresponding algorithm. The method allows you to vary the changes of the virtual object in real time.

**Keywords:** computer system, augmented reality, virtual object, plane of a real object.

Denys Levchenko, Andrii Podorozhnyak, Nataliia Liubchenko

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

## TOOLS AND METHODS FOR EXPLOSIVE OBJECTS DETECTION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND COMPUTER VISION

**Abstract. Relevance.** The problem of detecting explosive ordnance remains one of the most acute in the modern world and in Ukraine, in particular due to the growing number of armed conflicts and contamination of territories with landmines and unexploded ordnance. Traditional methods of demining are time-consuming, dangerous, time-consuming and not always effective, necessitating the introduction of innovative technologies based on artificial intelligence and computer vision. **Object of research.** The object of research is intelligent tools and methods for detecting explosive objects, in particular the proposed prototype combining deep learning (YOLOv8) and robotic platforms for real time. **Purpose of the article.** The article is aimed at analyzing existing solutions, developing and experimentally testing an efficient, portable system for automated mine detection using lightweight deep learning models capable of operating on mobile devices in a variety of environmental conditions. **Research results.** Two specialized datasets covering different types of mines (POM-2, POM-3, PMA-2 "starfish") and various environmental conditions, soil types, weather factors and the presence of obstacles were used, modernized and annotated in the work. To speed up the training of the AI models, distributed and parallel computing are applied. The YOLOv8-nano and YOLOv8-small models demonstrated high precision (up to 98.8%) and recall for major landmine classes, which was confirmed by the analysis of confusion matrices and key metrics. The focus is on the development and research of a prototype system for automated landmine detection based on deep learning and computer vision, integrated with robotic platforms and unmanned aerial vehicles. The system provides real-time operation (2-2.6 frames per second) on mobile devices, has a simple architecture and the ability to integrate with robotic and unmanned platforms. **Conclusions.** The proposed system is promising for humanitarian demining due to its high accuracy, mobility and ease of deployment. At the same time, the results of the experiments indicate the need for further improvement of models to increase resistance to changes in environmental conditions and reduce the number of false positives. The implementation of such solutions will contribute to increasing the efficiency and safety of demining in post-conflict regions.

**Keywords:** unmanned ground operations, landmine detection, artificial intelligence, visual data processing, computer vision, distributed and parallel computing.

### Introduction

Landmines and explosive ordnance continue to pose a significant humanitarian challenge, driven by the growing number of global conflicts. Vast land and urban areas remain contaminated with antipersonnel (AP) and antitank (AT) mines, as well as unexploded ordnances (UXOs), requiring decades for clearance using current technologies. Effective solutions demand improvements in detection, clearance, and victim assistance.

Traditional detection methods rely on metal detectors and ground-penetrating radar, often integrated into dual-mode handheld systems [1]. Recent advancements include UAV- or robot-mounted sensors such as microwave radar, infrared cameras, and magnetometers [2]. Surficial ordnance – either abandoned or cluster-deployed – also presents a growing risk, necessitating specialized detection tools.

Electronic sensors and AI-based image processing now enable autonomous systems capable of identifying and mapping surface threats. High-resolution cameras, paired with real-time AI analysis, offer reliable detection across varied environments. This study introduces a prototype system using a sensor-equipped, remotely operated robotic platform for detecting visible surface UXOs, notably the PFM-1 and PMA-2 plastic landmines, which remain common and deadly in post-conflict zones.

Recent efforts in object detection, particularly through deep learning, have enhanced identification accuracy across multiple fields – including autonomous navigation, surveillance, and now humanitarian demining. Both CNN- and transformer-based models can analyze high-resolution imagery, though not all support

real-time inference. The YOLO architecture was selected for its speed, efficiency, and portability.

The proposed system integrates real-time detection with robotic mobility, adaptable to additional platforms such as UAVs. This research presents a lightweight and high-recall solution tailored to operational constraints, addressing a critical gap in landmine detection through a practical, deployable, and scalable approach [3].

**Analysis of proposed system implementation.** The "Demining Robots" project deploys autonomous robots for landmine detection and removal. The UGO (Unmanned Ground Operations) robot is key in detecting surface landmines, using LiDAR, holographic radar, accelerometers, GPS (5 cm accuracy), RGB, and depth cameras. Some robots in the swarm also feature trip-wire detection to counter mines like the "starfish." Fig. 1 provides an overview of the swarm's functionalities [4].

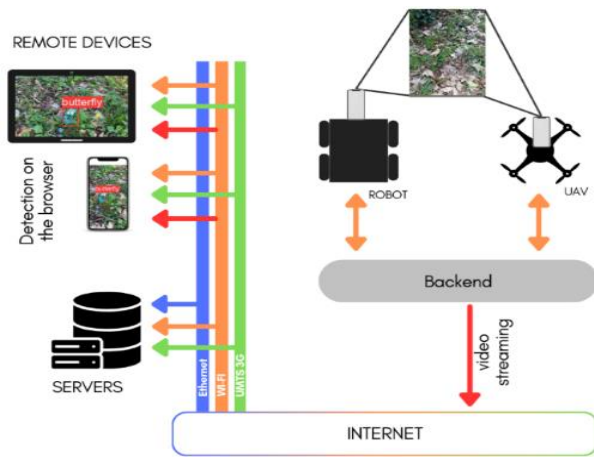
For real-time surface landmine detection, an RGB camera mounted on the robot is utilized, ensuring effective identification and processing of visual data [5].



**Fig. 1.** Details of demining robot. On the left, is the robot with the on-board GPS system and off-board GPS tower; on the right, a panoramic view of the robotic platform scanning the test field

As an example, a lightweight detection system has been introduced, capable of running on mobile devices operated by remote personnel at a safe distance from hazardous areas. The model's execution speed is dependent on the processing capabilities of the device, as it operates entirely within a web browser. The system architecture is illustrated in Fig. 2 [4].

The system demonstrates high flexibility, requiring only a Python backend to run on the robotic platform while connecting to a mobile camera. In this implementation, an iPhone 13 Pro serves as the primary sensor, utilizing its video camera to capture data as the robot navigates the environment. The backend streams video input from the camera, awaiting connection from the frontend interface.



**Fig. 2.** The proposed system architecture; the components of the camera, backend, and frontend are independent of the moving vehicle used; this flexibility makes it possible to be used both on robot (left) and UAV (right) vehicles

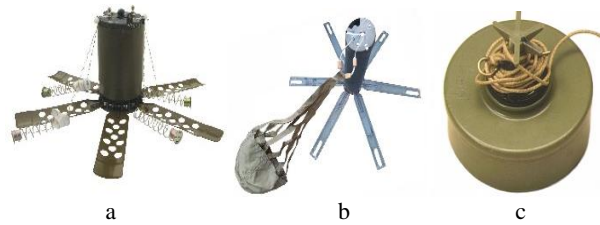
Upon connection, the frontend retrieves YOLO (You Only Look Once) ONNX (Open Neural Network Exchange) weights from various sources and processes the incoming video stream using the model. The processed images, along with detection results, are then displayed on the user interface, as depicted in the tablet and smartphone visuals in the top-left section of Fig. 2.

**Dataset creation and processing**

To create comprehensive datasets for training and testing a real-time surface landmine detection system, data was gathered in diverse conditions to mimic real-world scenarios. The datasets cover various factors, including:

- 1) environment: grass and gravel terrains to capture surface variations;
- 2) weather: multiple conditions like cloudy, sunny, and shadowy settings, affecting image quality and landmine visibility;
- 3) obstacles: presence of bushes, branches, walls, trees, trunks, and rocks, which can obscure landmines.

Two open datasets have been used as an example. The datasets specifically built for surface landmine object class. First dataset uses scale models of Russian POM-2 and POM-3 surface mines. The second dataset uses model of PMA-2 “starfish” landmine. All landmines are illustrated in Fig. 3.



**Fig. 3.** Images of used landmines: a – POM-2, b – POM-3, c – PMA-2 “starfish”

First dataset consists of 4485 images (88% are used for train set) with a valid set of 402 images where each image represents a mine (not only the mines illustrated above) that has been put under a certain environment and weather conditions and the test data set consisted of 249 images [7, 8]. Additional dataset details are presented in Table 1. The second dataset comprises 47 recorded videos, each with an average duration of 107 seconds, captured at a frame rate of 6 frames per second (FPS). Approximately 25% of the frames contain at least one landmine, resulting in 6,640 annotated frames out of a total of 29,109 frames in the dataset [4]. Additional dataset details are presented in Table 2.

**Table 1 – Data categories for the first dataset. Values were calculated from 4485 varying in resolution from 800px x 400px up to Full HD (1920px x 1080px)**

	Environment		Weather		
Split	Grass	Gravel	Sunny	Shadow	Cloudy
Train	2009	1892	2192	678	1031
Valid	296	106	164	97	141
Test	155	94	91	75	83

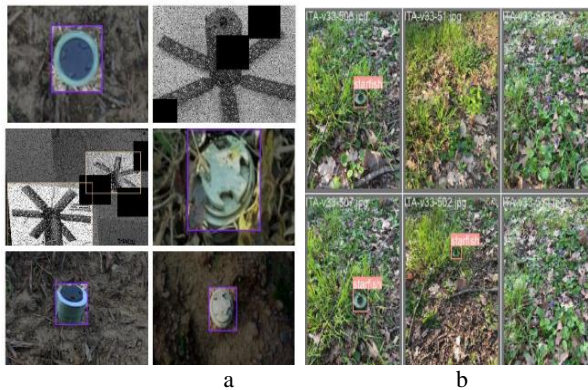
**Table 2 – Data categories. Values were calculated over the 47 ITA (Image Transformation Augmentation) videos (IID (Independent and Identically Distributed)), and 11 USA videos (OOD (Out of Distribution))**

	Environment		Weather		
Split	Grass	Gravel	Sunny	Shadow	Cloudy
Train	26	8	15	12	7
Valid	3	2	1	3	1
Test (IID)	4	2	2	3	2
Test (OOD)	11	0	8	1	2

**Model selection and determination**

The annotation process was conducted using the Computer Vision Annotation Tool (CVAT), a widely utilized framework for image annotation. Fig. 4 presents examples of annotated frames captured under various conditions. To meet the requirement for real-time processing in landmine detection, a single-stage object detection method was selected. Object detection approaches are generally categorized into single-stage and multi-stage methods. Multi-stage models, such as the R-CNN (Region-based Connected Neural Networks) family (R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN), first generate potential object regions before performing object detection within those regions [9, 10]. In contrast, single-stage models, such as YOLO, detect objects directly without a separate region proposal step [11, 12]. YOLOv8 was selected for its real-time performance and efficiency, crucial for landmine detection [13]. After conversion to ONNX, the models

became lightweight (3MB for "nano" and 11MB for "small"), ensuring easy deployment on platforms like browsers, smartphones, and tablets. This compact size reduces computational load while maintaining accuracy. YOLOv8's strong performance with smaller annotated datasets made it ideal for efficient landmine detection.



**Fig. 4.** Examples of annotated data using CVAT: a – for the first dataset; b – for the second dataset

AI-driven computer vision and multi-sensor robotics improve the efficiency and accuracy of explosive object detection. Using deep learning models like YOLOv8 with UGVs and UAVs enables real-time landmine detection in diverse environments [14]. Datasets reflecting different weather, terrain, and conditions enhance model reliability. Lightweight deployment on mobile devices ensures flexibility in hazardous areas, while advancements in AI, robotics, and aerial surveillance reduce risks and improve safety in demining operations, supporting global humanitarian efforts.

### Experimental setup

To thoroughly evaluate the performance of the landmine detection system, a set of metrics was defined to measure precision, recall, and overall model effectiveness across varying conditions [15]. These metrics are essential for minimizing false negatives, as accurate detection of each landmine is critical for safety. For this particular case a few key metrics were selected:

$$P = \frac{TP}{TP + FP},$$

P – precision, proportion of true positive predictions relative to all positive predictions made by the model; a higher precision indicates fewer false positives; TP – true positive predictions; FP – false positive predictions;

$$R = \frac{TP}{TP + FN},$$

R – recall, the proportion of true positive detections out of all actual positive cases; essential for reducing the likelihood of missed landmines; FN – false negative predictions;

$$A = 2 * \frac{P * R}{P + R},$$

A – the weighted average of Precision and Recall, reflecting the overall accuracy of the model. YOLOv8 model training was performed using the composed dataset, which was collected and annotated specifically for this task. The training process included the following stages:

1) pre-trained model: the initial phase involved training on the "ImageNet" dataset, comprising RGB images and corresponding annotations across 1000 classes sourced from the internet. This stage is essential for learning fundamental image features such as colors, shapes, and general object structures;

2) initial fine-tuning: fine-tuning was conducted using the "SurfLandmine" dataset, which consists of RGB video recordings annotated with landmine instances under various environmental conditions in Italy. Video sequences were divided into individual frames and shuffled to ensure variability. The dataset includes a range of weather conditions, soil types, and surroundings, providing a comprehensive base for robust training;

3) validation: a designated subset of data was utilized to validate model performance at intervals during the training process, ensuring the system's ability to generalize effectively to previously unseen data.

To accelerate the training process, distributed and parallel computing was applied.

### Results

The YOLOv8 model's effectiveness in landmine detection was evaluated using both IID and OOD data. Performance results for YOLOv8-nano model are shown in the confusion matrix (Table 3) and summarized in Table 4.

*Table 3 – Confusion matrix for YOLOv8-nano*

Predicted\ Actual	POM-2	POM-3	Starfish	Environment
POM-2	384	0	0	18
POM-3	0	188	0	9
Starfish	0	0	166	5
Environment	81	67	90	0

*Table 4 – Summary table for YOLOv8-nano*

Class	Precision (P, %)	Recall (R, %)	Avg. accuracy (A, %)
POM-2	95.5	82.6	88.6
POM-3	95.4	73.7	82.8
Starfish	97	64.8	77.7
Environment	-	0	-

Results breakdown for YOLOv8-nano:

– POM-2 class: TP = 384 (POM-2 predicted as mine POM-2); FN = 81 (POM-2 predicted as environment); FP = 18 (Environment predicted as POM-2).

– POM-3 class: TP = 188 (POM-3 predicted as mine POM-3); FN = 67 (POM-3 predicted as environment); FP = 9 (Environment predicted as POM-3);

– Starfish class: TP = 166 (Starfish predicted as mine Starfish); FN = 90 (Starfish predicted as environment); FP = 5 (Environment predicted as Starfish).

Another model used for results evaluation was YOLOv8-small. The observations are collected in the confusion matrix in Table 5 and summarized in Table 6.

Results breakdown for YOLOv8-small:

– POM-2 class: TP = 395 (POM-2 predicted as mine POM-2); FN = 90 (POM-2 predicted as environment); FP = 9 (Environment predicted as POM-2).

– POM-3 class: TP = 182 (POM-3 predicted as mine POM-3); FN = 51 (POM-3 predicted as

environment); FP = 7 (Environment predicted as POM-3);

– Starfish class: TP = 172 (Starfish predicted as mine Starfish); FN = 101 (Starfish predicted as environment); FP = 2 (Environment predicted as Starfish).

Table 5 – Confusion matrix for YOLOv8-small

Predicted\Actual	POM-2	POM-3	Starfish	Environment
POM-2	395	0	0	9
POM-3	0	182	0	7
Starfish	0	0	172	2
Environment	90	51	101	0

Table 6 – Summary table for YOLOv8-small

Class	Precision (P, %)	Recall (R, %)	Avg. accuracy (A, %)
POM-2	97.8	81.4	88.8
POM-3	96.3	78	86
Starfish	98.8	63	76.9
Environment	-	0	-

As shown in Table 4, the YOLOv8-nano model achieved high precision in detecting POM-2, POM-3, “starfish” mines with 95.5%, 95.4% and 97% respectively. However, it demonstrated lower precision for the “environment” class, where non-mine objects were often misclassified as threats. Despite the low false negative rates – a critical factor in mine detection – the model produced false positive rates of approximately 18% for POM-2, 26% for POM-3 and 35% for “starfish”.

Table 6 indicates similar behavior from the YOLOv8-small model, with a slight reduction in the overall false positive rate. Precision values for POM-2, POM-3 and “starfish” reached 97.8%, 96.3% and 98.8% respectively. While false positives for POM-3 decreased compared to the nano model, they still present challenges for real-world deployment. A detailed evaluation of the

model’s performance on the proposed datasets indicates that YOLOv8 models deliver strong recall and precision when operating within the training data distribution. Running at 2 FPS in a smartphone browser, the model demonstrates notable portability, with compact sizes of 3 MB (nano) and 11 MB (small), making it suitable for deployment on a wide range of devices. However, results highlight a significant distribution shift between IID and OOD data, emphasizing the composed dataset’s complexity and the challenge of object detection under unfamiliar conditions, as evidenced by a high false negative rate in OOD scenarios. These findings underscore the need for further model enhancement through targeted data augmentation, focused training on edge cases, and refined hyperparameter tuning to improve generalization.

## Conclusions

This study introduces a novel real-time surface landmine detection system integrated into a demining robot. Operating at 2.6 frames per second, the system is lightweight, user-friendly, and accessible through web browsers and smartphones. Its high recall rate marks a substantial step forward in improving landmine detection capabilities. To the best of current knowledge, this is the first approach to surface landmine detection with a strong emphasis on operational speed, resulting in longer deployment durations compared to UAV-based methods, which are typically constrained by battery limitations.

A key feature of the system is its handling of false positives – an inherent challenge in detection tasks. Although the YOLOv8-nano and YOLOv8-small models exhibit elevated false positive rates, this conservative approach is justified in landmine scenarios. Alerts can be promptly reviewed by a human operator via smartphone, reducing the chance of missing real threats and enhancing the safety of both robotic platforms and nearby personnel.

## REFERENCES

- Fedorenko G., Fesenko H. and Kharchenko V. Analysis of methods and development of the concept of guaranteed detection and recognition of explosive objects. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2022. No. 4(22). Pp. 20–31. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.22.020>.
- Qiu Z., Guo H., Hu J., Jiang H., and Luo C. Joint Fusion and Detection via Deep Learning in UAV-Borne Multispectral Sensing of Scattered Landmine. *Sensors*. 2023. Vol. 23. Iss. 12. Article number 5693. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23125693>.
- Levchenko D., and Podorozhniak A. Detection of explosive objects using artificial intelligence technologies. *Information Technologies: Science, Engineering, Technology, Education, Health: Proceedings of the XXXII International Scientific and Practical Conference MicroCAD-2024*, May 22-25, 2024– Kharkiv: NTU “KhPI” – P. 1406. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/88551>.
- Vivoli E., Bertini M., Capineri L. Deep Learning-Based Real-Time Detection of Surface Landmines Using Optical Imaging. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. Iss. 4. Article number 677. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16040677>.
- Levchenko D., and Podorozhniak A. Detection of explosive objects using artificial intelligence and computer vision. *Modern Directions in the Development of Information and Communication Technologies and Control Systems: Proceedings of the Fourteenth Scientific and Technical Conference* (April 25-26), Vol. 1. – Baku: NGO AR; Kharkiv: NTU “KhPI”, KhNURE; NAU “KhAI”; Žilina: UMŽ, 2024. – P. 63. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/76906>.
- Kharchenko V., Kliushnikov I., Rucinski A., Fesenko H., and Illiashenko O. UAV Fleet as a Dependable Service for Smart Cities: Model-Based Assessment and Application. *Smart Cities*. 2022. Vol. 5. Iss. 3. Pp. 1151–1178. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities5030058>.
- Kunichik O. Landmine detection with a mobile application. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 6. No. 2(132). Pp 6-13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.317103>.
- Kunichik O. Findmine Computer Vision Project, 2024. URL: <https://universe.roboflow.com/oleksandr-kunichik-sugbr/findmine>.
- Ren S., He K., Girshick R., and Sun J. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2017. Vol. 39 (6). Pp. 1137–1149. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2577031>.
- Podorozhniak A., Liubchenko N., Sobol M., Onishchenko D. Usage of Mask R-CNN for automatic license plate recognition. *Advanced Information Systems*. 2023. Vol. 7. Iss. 3. Pp. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.1.09>.

11. Redmon J., Divvala S., Girshick R., and Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016. Pp. 779–788. DOI: <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.91>.
12. Gavrylenko S., Wang Z. Pedestrian red light traffic recognition model based on YOLOv8 algorithm. *Advanced Information Systems*. 2025. Vol. 9. No. 2. Pp. 75–83. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.2.10>.
13. Mishchuk V., and Podorozhniak A. Analysis of Trade-Offs Between Accuracy and Speed of Real-Time Object Detectors for the Tasks of Explosive Ordnance Detection. *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology, KhPIWeek 2024*. Kharkiv, Ukraine. 2024. Pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/KHPIWEEK61434.2024.10878035>.
14. Baur J., Steinberg G., Nikulin A., Chiu K. and de Smet T. S. Applying Deep Learning to Automate UAV-Based Detection of Scatterable Landmines. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Iss. 5. Article number 859. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12050859>.
15. Pochanin G., Capineri L., Bechtel T., Ruban V., Falorni P., Crawford F., Ogurtsova T., and Bossi L. Radar Systems for Landmine Detection: Invited Paper. *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. Kharkiv, Ukraine. 2020. Pp. 1118–1122. DOI: <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252789>.

Received (Надійшла) 05.07.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.08.2025

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

- Левченко Денис Володимирович** – магістр, магістр кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;  
**Denys Levchenko** – Master of Computer Science, Master of System analysis and information-analytical technologies department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [denys.levchenko@cs.khpi.edu.ua](mailto:denys.levchenko@cs.khpi.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0002-3258-0196>.
- Подорожняк Андрій Олексійович** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;  
**Andrii Podorozhniak** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [andrii.podorozhniak@khpi.edu.ua](mailto:andrii.podorozhniak@khpi.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-6688-8407>;  
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202229410>.
- Любченко Наталія Юрївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;  
**Nataliia Liubchenko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of System analysis and information-analytical technologies department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine;  
e-mail: [andrii.podorozhniak@khpi.edu.ua](mailto:andrii.podorozhniak@khpi.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-4575-4741>;  
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202232887>.

#### Інструменти та методи виявлення вибухонебезпечних предметів з використанням штучного інтелекту та комп'ютерного бачення

Д. В. Левченко, А. О. Подорожняк, Н. Ю. Любченко

**Анотація.** У цьому дослідженні представлено детальний аналіз інструментів і методів, що використовуються, включно зі стратегіями збору даних, вибором моделі та архітектурою системи. Завдяки використанню технологій штучного інтелекту в режимі реального часу на роботизованих і повітряних платформах можливе досягнення прогресу в автоматизованому виявленні вибухонебезпечних предметів, що знижує ризики ручного розмінування та підвищує безпеку в уражених регіонах у всьому світі. **Актуальність.** Проблема виявлення вибухонебезпечних предметів залишається однією з найгостріших у сучасному світі та в Україні зокрема через зростання кількості збройних конфліктів і забруднення території мінами та нерозірваними боєприпасами. Традиційні методи розмінування є трудомісткими, небезпечними, вимагають багато часу та не завжди є ефективними, що зумовлює необхідність впровадження інноваційних технологій на основі штучного інтелекту та комп'ютерного бачення. **Об'єкт дослідження.** Об'єктом дослідження є інтелектуальні інструменти та методи виявлення вибухонебезпечних предметів, зокрема пропонується прототип, що поєднує глибоке навчання (YOLOv8) та роботизовані платформи для реального часу. **Мета статті.** Метою статті є аналіз існуючих рішень, розробка та експериментальна перевірка ефективної, портативної системи для автоматизованого виявлення мін із використанням легких моделей глибокого навчання, здатної працювати на мобільних пристроях у різноманітних умовах середовища. **Результати дослідження.** У роботі використано, модернізовано та анотовано два спеціалізовані датасети, що охоплюють різні типи мін (POM-2, POM-3, PMA-2 "starfish") та різноманітні умови навколишнього середовища, типи ґрунтів, погодні фактори та наявність перешкод. Для пришвидшення тренування моделі штучного інтелекту застосовано розподілені та паралельні обчислення. Моделі YOLOv8-nano та YOLOv8-small продемонстрували високу точність (precision до 98,8%) і recall для основних класів мін, що підтверджено аналізом матриць плутанини та ключових метрик. Основна увага приділяється розробці та дослідженню прототипу системи для автоматизованого виявлення мін на основі глибокого навчання та комп'ютерного бачення, інтегрованої з роботизованими платформами та безпілотними літальними апаратами. Система забезпечує роботу у реальному часі (2–2,6 кадрів/с) на мобільних пристроях, має просту архітектуру та можливість інтеграції з роботизованими і безпілотними платформами. **Висновки.** Запропонована система є перспективною для гуманітарного розмінування завдяки високій точності, мобільності та простоті розгортання. Водночас результати експериментів вказують на необхідність подальшого вдосконалення моделей для підвищення стійкості до зміни умов середовища та зменшення кількості хибнопозитивних спрацювань. Впровадження таких рішень сприятиме підвищенню ефективності та безпеки розмінування у постконфліктних регіонах.

**Ключові слова:** безпілотні наземні операції, виявлення мін, штучний інтелект, обробка візуальних даних, комп'ютерне бачення, розподілені та паралельні обчислення.

Eduard Malokhvii

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine

## ADAPTIVE FILTERING AND DYNAMIC COMPUTATION OFFLOADING FOR RESILIENT TASK EXECUTION IN IIOT

**Abstract. Relevance.** The execution of time-sensitive tasks in Industrial Internet of Things (IIoT) systems requires decentralized and fault-tolerant computing models that can operate under dynamic workloads, unstable node availability, and limited resources. **Object of research:** task management and offloading processes in edge–fog IIoT environments. **Purpose of the article.** Development of a method for decentralized, latency-aware task processing using adaptive filtering and dynamic computation offloading, which ensures high availability, efficient resource usage, and responsiveness in distributed edge systems. **Research results.** The paper presents the AFDCO method, which integrates local data filtering, node availability evaluation, latency-based offloading, and lightweight redundancy into a unified framework. This approach enables autonomous and fault-resilient task execution without relying on centralized controllers. Simulation results confirm that AFDCO reduces response time, improves task deadline compliance, and minimizes network and energy overhead. **Conclusions.** Compared to static or centralized task allocation models, the proposed method demonstrates better adaptability and robustness under variable conditions by dynamically adjusting execution and replication strategies based on system feedback. Scope of application of the obtained results: distributed IIoT systems, edge–fog computing platforms, and low-latency industrial automation scenarios requiring decentralized execution and fault recovery.

**Keywords:** Industrial Internet of Things, Edge Computing, Task Offloading, Redundancy, Latency-Aware Scheduling, Fault Tolerance, Adaptive Filtering, Decentralized Systems.

### Introduction

The rapid expansion of the Internet of Things (IoT) has led to an unprecedented increase in the number of interconnected devices and sensors. These devices generate massive amounts of data, which traditionally have been processed in centralized cloud servers [1–3]. However, this approach introduces significant latency issues due to the physical distance between data sources and data processing centers. As real-time data processing becomes increasingly critical for applications such as autonomous vehicles, smart cities, and healthcare monitoring, the limitations of cloud computing have necessitated the development of more efficient data management solutions [4, 5]. IoT edge computing has emerged as a viable alternative, offering a decentralized approach where data is processed closer to its point of origin, thereby reducing latency and improving response times [6, 7].

The evolution of the Industrial Internet of Things (IIoT) has revolutionized the way data is generated, transmitted, and processed across modern industrial infrastructures. With the proliferation of smart sensors, actuators, and intelligent control systems, industrial environments now produce vast volumes of heterogeneous, latency-sensitive data that must be processed in real time [1-2]. Traditional cloud-based processing paradigms struggle to meet the stringent timing and availability requirements of such systems due to their reliance on remote data centers, which introduce inherent network delays, potential bandwidth congestion, and limited reliability during connectivity disruptions [3].

To overcome these limitations, edge and fog computing architectures have emerged as decentralized models that enable computational tasks to be offloaded and executed closer to data sources [4]. Edge nodes deployed near the physical endpoints, reduce response latency, alleviate network loads, and support real-time analytics for mission-critical operations such as predic-

tive maintenance, industrial automation, and remote supervision [5]. Fog nodes, situated between the edge and cloud, provide an intermediate layer for coordination, caching, and fallback computation. While this architectural shift significantly improves system responsiveness, it introduces new challenges related to task allocation, fault tolerance, and decentralized decision-making in highly dynamic and resource-constrained environments.

Maintaining system availability and reliability under conditions of partial node failure, resource instability, and unpredictable network performance remains a critical challenge for IIoT deployments. Many existing task scheduling and offloading methods depend on centralized control or assume static system behavior, which makes them prone to single points of failure and limits their applicability in scalable, distributed industrial settings [6]. In addition, most solutions do not incorporate latency sensitivity or perform real-time evaluation of node availability, both of which are essential for consistent operation under variable workloads and changing environmental conditions [7].

To address these challenges, we propose a novel latency-aware and decentralized task management method designed specifically for edge–fog–cloud environments in IIoT systems. The proposed method integrates dynamic task offloading, adaptive backup allocation, and localized decision-making to enhance service continuity and processing efficiency. Each node independently evaluates its own availability, resource load, and communication latency, enabling it to select the most suitable execution paths for incoming tasks. A redundancy-aware model ensures that backup execution plans are in place in case of primary node failure, while the decentralized coordination protocol eliminates dependence on global control entities.

This paper presents the design, mathematical modeling of the proposed method, followed by simulation-based evaluation in a representative IIoT setting. The

contributions of this work are relevant for industrial applications requiring high availability, low latency, and scalable computing strategies under real-world deployment conditions.

### Related Works

The increasing complexity and scale of IIoT deployments have intensified the need for efficient task management frameworks capable of addressing latency sensitivity, system availability, and fault tolerance in resource-constrained and dynamic environments. Cloud-centric architectures, though powerful in terms of computation and storage, are often unsuitable for real-time applications due to long transmission delays, congestion, and lack of localized control [7]. Edge computing has emerged as a promising alternative, enabling data processing closer to the source and offering better responsiveness, bandwidth efficiency, and context-awareness [8].

Despite these advantages, edge environments pose new challenges such as limited computational capacity, energy constraints, heterogeneous hardware, and vulnerability to failure. Ensuring stable task execution under such conditions requires decentralized, lightweight, and fault-resilient mechanisms. Static or centrally managed systems often fall short in dynamic IIoT settings, particularly where mobility, connectivity disruption, or partial node failure are present [9].

To enhance system responsiveness and availability, various studies have proposed collaborative task execution through dynamic group formation among edge nodes. These approaches typically assign subtasks to multiple nearby nodes within execution clusters, which improves load balancing and resource utilization [10]. However, many of these techniques rely on centralized orchestration or assume a known and stable network topology, reducing their flexibility in mobile and failure-prone environments.

Fault tolerance is often addressed through task replication, where primary and backup nodes are statically assigned. While this enhances availability, static redundancy schemes frequently lead to inefficient resource usage, high energy consumption, and increased communication overhead. Moreover, they often do not account for the real-time availability or reliability of nodes, limiting their effectiveness in edge environments where conditions change rapidly [11].

Fog computing has been proposed as an intermediate layer between edge and cloud to support caching, aggregation, and fallback execution. Such architectures improve scalability and reduce the need for central coordination, but they often depend on periodic synchronization or rely on semi-centralized management entities, which introduce latency and complexity [12].

Recent efforts have introduced availability-aware and redundancy-controlled task scheduling. These approaches use metrics such as task priority, node failure probability, and resource availability to optimize offloading and backup selection [13]. However, most of them still rely on predefined thresholds or global state, and few implement adaptive redundancy levels that change based on observed network or node conditions.

Cluster-based coordination has also been investigated to improve stability under node mobility and intermittent connectivity. These solutions form temporary execution clusters based on proximity or link quality, enabling stable communication. Yet, they typically do not integrate tightly with runtime scheduling logic or support real-time failover [14].

In summary, existing works often address latency optimization, fault tolerance, or decentralization in isolation. Centralized models suffer from scalability limitations and single points of failure, while static redundancy schemes fail to adapt to runtime conditions. Decentralized approaches frequently lack latency awareness or coordinated backup planning. To overcome these gaps, this paper introduces a fully decentralized task management method that combines adaptive data filtering, dynamic node availability scoring, latency-sensitive offloading, and real-time redundancy adjustment. The proposed method operates without global coordination, enabling robust, responsive, and scalable task execution across heterogeneous IIoT systems.

### Proposed Method

The proposed method, Adaptive Filtering and Dynamic Computation Offloading (AFDCO) is designed to support low-latency and highly available task execution in decentralized IIoT environments. It operates within a multi-layer architecture composed of sensor-level devices, edge nodes, and fog/cloud servers. Unlike traditional cloud-centric systems or statically replicated edge models, AFDCO emphasizes autonomy, responsiveness, and resilience through localized decision-making, real-time evaluation of execution conditions, and adaptive redundancy mechanisms. Each component of the method contributes to efficient task management in dynamic settings. Adaptive data filtering at the device level reduces computational and network load. Node availability evaluation allows the system to prioritize stable and underutilized nodes. Latency-aware offloading ensures timely task execution by selecting the most suitable execution path. The redundancy mechanism provides localized failover recovery without centralized coordination. Finally, runtime adaptability enables the system to continuously reconfigure itself in response to workload fluctuations and node behavior changes.

#### A. Adaptive Data Filtering

To minimize the volume of redundant or non-critical data entering the processing pipeline, AFDCO applies adaptive filtering at the data generation level. This mechanism is particularly important in IIoT scenarios with high-frequency telemetry and constrained communication channels. Each device or edge node evaluates incoming data points using a threshold-based filter:

$$d_t \in T_i \Leftrightarrow f(d_t, \phi_t) = true,$$

where  $d_t$  is a data point at time  $t$ , and  $\phi_t$  is a dynamically adjusted threshold reflecting the current system state. The filtering function determines whether the data point should trigger task creation based on its deviation from expected patterns, the criticality of the source, and the node's current load.

The threshold  $\phi_t$  increases in response to elevated queue lengths, network congestion, or high CPU utilization. Under stable or low-load conditions, the threshold is relaxed, allowing more data to pass through. This dynamic behavior ensures that task generation adapts to the system's ability to process and deliver results in real time. By filtering data early, AFDCO reduces transmission delays, conserves bandwidth, and prevents processing units from being overwhelmed by non-urgent computations. This mechanism plays a crucial role in maintaining overall system responsiveness, especially under bursty traffic or degraded network conditions.

### B. Node Availability Evaluation

To ensure that tasks are assigned to the most reliable and capable nodes, AFDCO includes a decentralized mechanism for evaluating node availability in real time. This component enables each node to make informed scheduling decisions based on the operational health and workload status of itself and its neighbors, without requiring global system knowledge.

Each node computes an availability score  $A_j$  for every candidate node  $N_j$  using a weighted model:

$$A_j = \alpha \cdot U_j + \beta \cdot (1 - Q_j) + \gamma \cdot (1 - F_j),$$

where  $U_j$  represents the normalized uptime ratio of node  $N_j$  over a defined observation window,  $Q_j$  denotes the current task queue utilization ( $Q_j \in [0,1]$ ),  $F_j$  is the recent failure rate, calculated as the ratio of failed or expired tasks to total assigned tasks,  $\alpha, \beta, \gamma \in [0,1]$  are application-specific weight coefficients satisfying  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ .

This scoring model reflects both short-term fluctuations and long-term reliability trends. Nodes with higher scores are interpreted as more available, stable, and responsive, making them more favorable for task execution or backup assignment.

Each node maintains a local state table that includes availability scores for itself and neighboring nodes. These scores are updated periodically based on internal monitoring and lightweight status exchanges. This decentralized update mechanism avoids the overhead and fragility associated with centralized state synchronization.

The availability score plays a critical role in two decision-making stages. First, it influences the selection of execution nodes during task offloading, balancing latency performance with node reliability. Second, it is used to rank backup candidates, ensuring that redundancy mechanisms rely on nodes with a low probability of failure and sufficient spare capacity.

By quantifying node stability and workload pressure in real time, this component enables AFDCO to dynamically adapt task placement strategies to the current system context. As a result, task distribution becomes both resilient to failures and efficient in terms of resource utilization.

### C. Latency-Aware Task Offloading

AFDCO incorporates a decentralized offloading mechanism that selects the most suitable execution node for each task based on expected latency and availability.

This ensures that computational tasks are completed within application-specific deadlines while maintaining system responsiveness under dynamic conditions.

When a new task  $T_i$  is generated, the originating node  $N_k$  estimates its local processing delay using:

$$L_i^k = \tau_{comm}^{i,k} + \tau_{proc}^{i,k},$$

where  $\tau_{comm}^{i,k}$  is the expected communication delay and  $\tau_{proc}^{i,k}$  is the estimated time to process the task locally. If  $L_i^k$  exceeds the task's latency constraint, the node initiates offloading by evaluating a subset of candidate nodes  $N_j$ . Each candidate is scored using a composite suitability function:

$$S_i^j = \theta \cdot \left(1 - L_i^j / L_{max}\right) + (1 - \theta) \cdot A_j,$$

where  $L_i^j$  is the estimated latency on node  $N_j$ ,  $A_j$  is the availability score of node  $N_j$ ,  $L_{max}$  is the maximum tolerated latency for normalization,  $\theta \in [0,1]$  controls the trade-off between latency sensitivity and reliability.

The node  $N_p$  with the highest score  $S_i^p$  is selected as the primary executor. To increase fault tolerance, a backup node  $N_b$  is also selected if it satisfies the proximity condition:

$$|S_i^p - S_i^b| < \delta,$$

where  $\delta$  is a redundancy margin threshold. This condition ensures that the backup node is sufficiently comparable to the primary in terms of responsiveness and stability.

This latency-aware offloading scheme enables AFDCO to avoid bottlenecks, bypass overloaded or unstable nodes and maintain compliance with real-time execution deadlines. The decision process is lightweight and fully decentralized, requiring only local estimation and limited peer communication.

Moreover, the offloading logic naturally adapts to network conditions. When local latency is low, tasks are executed without offloading. As latency or queue depth increases, the system shifts execution to more suitable nodes, balancing load and reducing the probability of deadline violations.

### D. Redundancy and Localized Recovery

To ensure continuity of task execution in the presence of partial node failures or disconnections, AFDCO incorporates a lightweight redundancy mechanism with localized failover control. This mechanism improves system availability without requiring centralized orchestration or global state monitoring.

For each task  $T_i$ , once the primary execution node  $N_p$  is selected, a backup node  $N_b$  is assigned based on its suitability score and its proximity to the primary. The backup remains in standby mode, maintaining a minimal copy of the task context, including task parameters, metadata, and priority level. No active processing is performed on the backup unless failure is detected on the primary path.

Failure detection relies on timeout-based monitoring. After dispatching a task to  $N_p$ , the origin node or an organizer node expects periodic acknowledgments confirming task receipt and execution progress. If no acknowledgment is received within a predefined window  $\tau_{fail}$ , the backup node is activated and resumes execution from the preserved task context.

This decentralized failover process reduces recovery latency and eliminates the need for complex checkpointing or rollback protocols. The replication strategy adapts to runtime conditions by selecting backups dynamically using availability scores, rather than through static assignments. Unlike traditional high-availability models that reserve resources continuously for backup tasks, AFDCO's on-demand redundancy preserves edge resources by activating backups only when necessary. This is particularly important in constrained IIoT environments where computational and energy budgets are limited. Additionally, if the original primary node recovers after failover, conflict resolution is handled through task versioning and coordination between nodes. The task instance with the most recent execution state is retained, and duplicate execution is avoided.

Overall, the redundancy and recovery mechanism in AFDCO ensures robust operation in unstable and failure-prone networks. It allows tasks to be completed despite hardware faults, connectivity loss, or overload, thus supporting high application-level availability across distributed edge-fog infrastructures.

#### **E. Runtime Adaptability**

AFDCO is designed to operate effectively under the variable and unpredictable conditions typical of industrial IoT environments. To this end, the method incorporates runtime adaptability, allowing its key components to dynamically reconfigure in response to system state changes without requiring external intervention or centralized control.

All critical operational parameters within AFDCO are adaptive. The filtering threshold  $\alpha$ , used to determine the relevance of incoming data, is continuously updated based on CPU load, queue length, and task urgency. This enables the system to prioritize critical inputs during peak demand periods while reducing overhead during stable conditions. Similarly, the availability score weights  $\alpha, \beta, \gamma$ , which influence node selection, can be rebalanced over time to reflect changing performance characteristics or evolving reliability patterns. For example, in scenarios with increased task failure rates, more emphasis can be placed on historical success metrics to avoid overloading unstable nodes.

The offloading strategy, governed by the trade-off parameter  $\theta$ , is also adjustable at runtime. When low-latency execution becomes more critical than node reliability (e.g., during alarm conditions),  $\theta$  can be increased to prioritize speed over availability. Conversely, in degraded network conditions, lowering  $\theta$  shifts preference toward stable execution paths.

In terms of redundancy, the threshold  $\delta$  that governs backup selection can be tightened or relaxed depending on observed failure trends or energy constraints. This ensures that resources are not wasted on

unnecessary replication under stable conditions, while maintaining fault coverage during periods of instability.

The adaptability of AFDCO is achieved through localized monitoring and feedback. Each node independently tracks system conditions and tunes its behavior accordingly, enabling a fully decentralized form of self-optimization. No global coordination is required, and system-wide adaptation emerges from the aggregation of local decisions.

This runtime flexibility allows AFDCO to maintain high levels of responsiveness, reliability, and efficiency even as network topology, workload intensity, or device availability change over time. It ensures that the system remains resilient and effective in both normal and adverse operating conditions, making it well-suited for real-world IIoT deployments.

## **Results and Discussion**

To evaluate the performance of the proposed AFDCO method, a series of simulations were conducted in a virtual IIoT environment modeled after a hierarchical edge-fog-cloud architecture. The simulation environment included 72 edge nodes with heterogeneous CPU and memory configurations, 8 organizer nodes responsible for group coordination, and 1 central cloud server. End devices generated time-sensitive tasks at variable intervals, simulating dynamic workloads common in industrial monitoring and control system. Each edge node was initialized with resource parameters (CPU: 2–8 cores, RAM: 2–16 GB) randomly selected from a defined distribution to reflect real-world heterogeneity. Node failure events were introduced probabilistically, with availability rates ranging from 60% to 100%, to test the method's fault resilience. The network latency between nodes was modeled using a Gaussian distribution with a mean of 15 ms and a standard deviation of 5 ms. Each experiment was repeated 20 times, and average results were recorded. The performance of AFDCO was compared against three baseline strategies: cloud-only task execution, edge execution without redundancy, and static redundancy assignment with no latency awareness. All models were evaluated using the same workload profiles and network conditions. Metrics of interest included average response time, task success rate, network utilization, and energy consumption.

Results demonstrated that AFDCO significantly reduces application latency by minimizing unnecessary data transmission and enabling localized execution. While cloud-based models experienced delays exceeding 6000 ms under high task loads, AFDCO consistently maintained latency below 1500 ms, even with multiple concurrent sources. This improvement is attributed to adaptive filtering at the device level, which limits non-critical task generation, and latency-aware offloading, which prioritizes nodes in optimal conditions. The performance trend is illustrated in Fig. 1. In terms of reliability, AFDCO achieved a higher task deadline success rate under varying system loads and node failure rates. Even with 30% of edge nodes intentionally deactivated, AFDCO maintained a deadline compliance rate above 90%, outperforming the baseline methods. This resilience is made possible by continuous evaluation of node availability and dynamic backup selection based on real-time system feedback, as shown in Fig. 2.

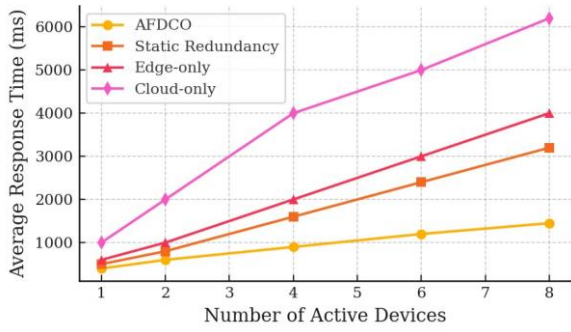


Fig. 1. Average response time under increasing task load

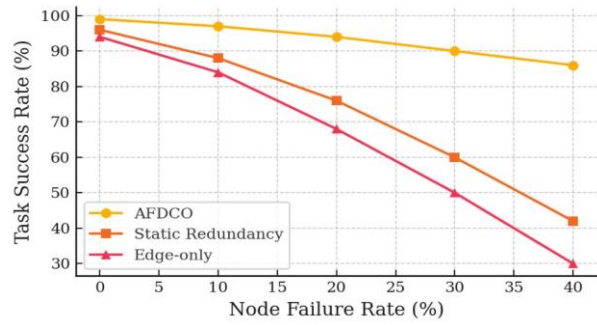


Fig. 4. Task success rate under increasing node failure rate

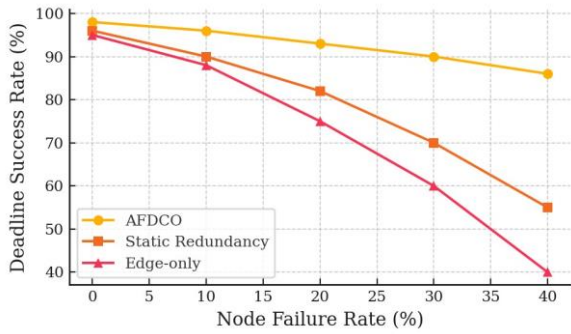


Fig. 2. Deadline success rate under varying node availability

Network utilization was also reduced due to early-stage data suppression and selective task replication. Compared to static redundancy models, AFDCO lowered overall data transfer volume by up to 30%, while cloud-only systems generated more than twice the traffic. This reduction is illustrated in Fig. 3. Additionally, the reduced communication overhead contributed to lower energy consumption, as backup nodes in AFDCO remain inactive unless triggered by failure, avoiding unnecessary standby power use common in static high-availability systems. The system exhibited strong fault recovery capabilities. As node failures increased to 40%, task success rates remained above 85% without requiring centralized coordination. AFDCO adjusted the level of redundancy dynamically, increasing replication when instability was detected and relaxing it under stable conditions, thereby optimizing resource usage. This behavior is demonstrated in Fig. 4.

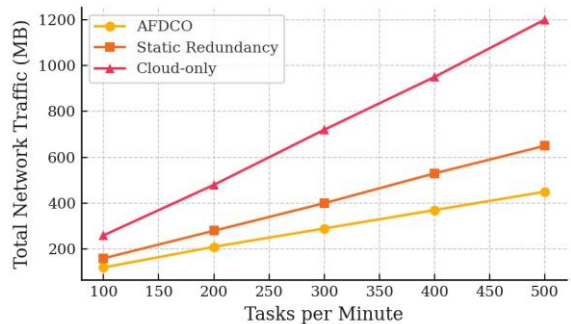


Fig. 3. Network traffic volume across task generation rate

Overall, the experimental results confirm that AFDCO provides a balanced trade-off between responsiveness, fault tolerance, and resource efficiency, making it suitable for deployment in decentralized IIoT systems where latency constraints, dynamic environments, and limited resources must be addressed simultaneously.

### Conclusion

The research presents AFDCO, a decentralized method for adaptive filtering and dynamic task offloading in edge–fog–cloud environments for industrial IIoT systems. The method addresses key challenges associated with latency sensitivity, fluctuating resource availability, and fault tolerance in highly distributed and dynamic networks. By integrating locally applied data filtering, real-time node evaluation, latency-aware task allocation, and lightweight redundancy mechanisms, AFDCO enables efficient and resilient execution of tasks without relying on centralized control.

Unlike traditional cloud-based or statically replicated edge models, AFDCO empowers each node to autonomously evaluate its workload, availability, and response time to make informed scheduling decisions. The adaptive filtering component significantly reduces the amount of non-essential data entering the system, helping to avoid congestion and allowing nodes to prioritize critical computations. The task offloading mechanism selects execution candidates based on a composite score that balances latency estimates and availability metrics, ensuring that each task is processed in the most suitable location with minimal delay.

To improve reliability, AFDCO introduces dynamic backup assignments and decentralized failover management. Rather than relying on pre-allocated resources, the system continuously re-evaluates backup candidates during runtime. Backup nodes remain idle until failure is detected on the primary path, allowing for rapid recovery without unnecessary energy consumption or communication overhead. This design enables high task completion rates even under node failure scenarios, as demonstrated in experimental evaluations. The results show that AFDCO consistently outperforms baseline configurations in terms of application latency, deadline compliance, fault resilience, and resource efficiency. In scenarios with high task concurrency or intermittent edge availability, the method maintained low response times and sustained execution success rates above 85%, while reducing network traffic and energy usage. These findings highlight the method's suitability for real-world IIoT deployments, where responsiveness, reliability, and scalability are simultaneously required.

Future research will aim to enhance AFDCO by incorporating predictive models that utilize historical workload patterns to improve scheduling accuracy under uncertainty. Additional focus will be placed on supporting node mobility and context-aware task migration in highly dy-

namic topologies. The method may also be extended to operate across federated fog infrastructures, enabling coordination between multiple administrative domains. Finally, deploying AFDCO on physical edge hardware and evaluat-

ing its performance under real industrial workloads will provide deeper insight into its practical applicability, particularly in terms of real-time responsiveness, energy efficiency, and integration with existing IIoT platforms.

## REFERENCES

1. R. P. Singh, M. Javaid, A. Haleem, and R. Suman, "Internet of things (IoT) applications to fight against COVID-19 pandemic Diabetes & Metabolic Syndrome", *Clinical Research & Reviews*, vol. 14, no. 4, pp. 521-524, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dsx.2020.04.041>
2. C. Gong, F. Lin, X. Gong, and Y. Lu, "Intelligent Cooperative Edge Computing in Internet of Things", *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 10, pp. 9372-9382, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2986015>
3. L. Cui, S. Yang, Z. Chen, Y. Pan, Z. Ming, and M. Xu, "A Decentralized and Trusted Edge Computing Platform for Internet of Things", *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7 no. 5, pp. 3910-3922, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2951619>
4. M. S. Elbamby, C. Perfecto, C. F. Liu, J. Park, S. Samarakoon, X. Chen, and M. Bennis, "Wireless Edge Computing with Latency and Reliability Guarantees", *Proc. IEEE*, vol. 10 (8), pp. 1717-1737, 2019, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.05316>
5. H. El-Sayed, S. Sankar, M. Prasad, D. Puthal, A. Gupta, M. Mohanty, and C. T. Lin, "Edge of Things: The Big Picture on the Integration of Edge, IoT and the Cloud in a Distributed Computing Environment", *IEEE Access*, vol 6, pp. 1706-1717, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2780087>
6. A. Javed, K. Heljanko, A. Buda, and K. Främling, "CEFIoT: A Fault-Tolerant IoT Architecture for Edge and Cloud", 2018 IEEE 4th world forum on internet of things (WF-IoT), pp. 813-818, 2018, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.08433>
7. G. Premsankar, M. D. Francesco, and T. Taleb, "Edge Computing for the Internet of Things: A Case Study", *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 1275-1284, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2805263>
8. W. Yu, F. Liang, X. He, W. G. Hatcher, C. Lu, J. Lin, and X. Yang, "A Survey on the Edge Computing for the Internet of Things", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 6900-6919, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2778504>
9. Y. Zhang, X. Chen, Y. Chen, Z. Li, and J. Huang, "Cost Efficient Scheduling for Delay-Sensitive Tasks in Edge Computing System", 2018 IEEE Int. Conf. on Services Computing, pp. 73-80, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/SCC.2018.00017>
10. Y. Sahni, J. Cao, and L. Yang, "Data-Aware Task Allocation for Achieving Low Latency in Collaborative Edge Computing", *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6 no. 2, pp. 3512-3524, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2886757>
11. C. Avasalcari, C. Tsigkanos, and S. Dustdar, "Decentralized Resource Auctioning for Latency-Sensitive Edge Computing", 2019 IEEE Int. Conf. on Edge Computing, pp. 72-76, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/EDGE.2019.00027>
12. M. Mudassar, Y. Zhai, L. Liao, and J. Shen, "A Decentralized Latency-Aware Task Allocation and Group Formation Approach With Fault Tolerance for IoT Applications", *IEEE Access*, 8, pp. 49212-49223, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979939>
13. S. Latre, P. Leroux, T. Coenen, B. Braem, P. Ballon, and P. Demeester, "City of things: An integrated and multi-technology testbed for IoT smart city experiments", *Proc. IEEE Int. Smart Cities Conf. (ISC)*, pp. 1-8, Sep. 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/ISC2.2016.7580875>
14. H.-L. Truong, and S. Dustdar, "Principles for Engineering IoT Cloud Systems", *IEEE Cloud Comput.*, vol. 2, no. 2, pp. 68-76, Mar. 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/MCC.2015.23>

Received (Надійшла) 02.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.07.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Малохвій Едуард Едуардович** – аспірант, кафедра комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

**Eduard Malokhvii** – PhD candidate, Department of Computer Engineering and Programming, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [malokhvii.ee@gmail.com](mailto:malokhvii.ee@gmail.com); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0008-0311-6400>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59179728600>.

**Adaptive Filtering and Dynamic Computation Offloading for Resilient Task Execution in IIoT**

Е. Е. Малохвій

**Анотація. Актуальність.** Виконання задач з жорсткими часовими вимогами в системах промислового Інтернету речей (IIoT) потребує децентралізованих та відмовостійких обчислювальних моделей, здатних функціонувати за динамічних навантажень, нестабільної доступності вузлів і обмежених ресурсів. **Об'єкт дослідження:** процеси керування виконанням та оффлоудингом задач у середовищах крайових-туманних архітектури IIoT. **Мета статті.** Розробка методу децентралізованої обробки задач з урахуванням затримки, який ґрунтується на адаптивній фільтрації та динамічному оффлоудингу обчислень, що забезпечує високу доступність, ефективне використання ресурсів і швидке реагування у розподілених системах. **Результати дослідження.** Запропоновано метод AFDCO, який об'єднує локальну фільтрацію даних, оцінювання доступності вузлів, оффлоудинг з урахуванням затримки та легкий механізм резервування в єдину децентралізовану схему. Метод забезпечує автономне та відмовостійке виконання задач без залучення централізованого керування. Результати моделювання підтверджують зниження затримок, покращення дотримання термінів виконання задач і зменшення навантаження на мережу та споживання енергії. Висновки. У порівнянні з централізованими або статичними моделями розподілу задач, запропонований метод краще адаптується до змін у системі та забезпечує стабільну роботу завдяки динамічному регулюванню виконання та реплікації. Сфера застосування отриманих результатів: розподілені системи IIoT, платформи крайових-туманних обчислень та сценарії промислової автоматизації з низькою затримкою, що потребують децентралізованого виконання та відновлення після збоїв.

**Ключові слова:** промисловий Інтернет речей (IIoT), кордонні обчислення, передача задач на виконання, резервування, планування з урахуванням затримки, відмовостійкість, адаптивна фільтрація, децентралізовані системи

Л. Ю. Остапенко, В. С. Харченко

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

## СИСТЕМА ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПОДОЛАННЯ ПЕРЕШКОД І ОРГАНІЗАЦІЇ КОМУНІКАЦІЙ В НЕБЕЗПЕЧНИХ ПРОСТОРАХ: СТРУКТУРА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

**Анотація.** У статті представлено комплексну систему моделювання подолання перешкод та організації комунікацій у небезпечних просторах із застосуванням роєвих безпілотних апаратів. Запропоновані моделі середовища, перешкод, динамічних впливів та БПА дозволяють відтворювати сценарії роботи у зруйнованих або важкодоступних приміщеннях, враховуючи статичні й динамічні об'єкти, а також кіберфізичні впливи. Архітектура симулятора побудована на базі Python та рушія Panda3D з інтеграцією засобів збору й аналізу даних (InfluxDB, Grafana, Docker), що забезпечує гнучке налаштування параметрів та відтворення широкого спектра сценаріїв. У статті наведено результати експериментів, що демонструють ефективність алгоритмів маршрутизації (A\*, Greedy Best-First тощо) та координації рою для розгортання ланцюжка зв'язку з використанням Li-Fi. Доведено, що система є корисним навчально-дослідницьким інструментом для перевірки алгоритмів, аналізу надійності рою, оцінки енергоефективності та стійкості до кібервпливів. Перспективи розвитку передбачають інтеграцію з ROS, розширення бібліотеки датчиків та моделювання протоколів мережевого рівня.

**Ключові слова:** моделювання, безпілотні апарати, розгортання рою БПА, небезпечне середовище, маршрутизація, маршрути, оминання перешкод, комунікації, Li-Fi, Panda3D, кіберфізичні впливи.

### Вступ

Надзвичайні ситуації (техногенні аварії, стихійні лиха, військові дії тощо) часто призводять до відмов, руйнування або знищення стаціонарної інфраструктури зв'язку. У таких умовах виникає потреба у швидкому розгортанні тимчасових мереж, здатних передавати дані від сенсорів і постраждалих до кризових центрів. Безпілотні літальні апарати (БПЛА, або просто безпілотні апарати – БПА) все частіше розглядаються як перспективний засіб відновлення комунікацій у важкодоступних і небезпечних зонах. Зокрема, дрони можуть слугувати “літаючими” ретрансляторами або навіть базовими станціями для створення тимчасових мереж там, де наземний зв'язок відсутній. Наприклад, у роботі розглядається мережа оптичного зв'язку Light Fidelity (LiFi) на базі рою дронів для збору даних у зруйнованих аварією приміщеннях, що дозволяє оперативно передавати інформацію до рятувального штабу навіть за відсутності радіозв'язку. Інше дослідження демонструє можливості дронів відновлювати радіозв'язок у зонах лиха, підтримуючи комунікацію рятувальників. Також розглядається використання різних безпілотних платформ (наземних, надводних) залежно від типу середовища та завдань [1]. Дрони вже застосовуються для моніторингу стану критичної інфраструктури та безпеки міст [2], пошуку постраждалих, а також гуманітарного розмінування та виявлення вибухонебезпечних предметів [3]. Зокрема, досліджуються методи використання БПЛА для виявлення мін та вибухівки на небезпечних територіях [4], а також гібридні роботизовані системи з біологічними сенсорами для пошуку вибухових пристроїв [5]. Всі ці задачі потребують ретельної попередньої перевірки алгоритмів і моделювання сценаріїв, адже безпілотні апарати мають працювати в динамічних, непередбачуваних умовах.

Небезпечний простір (НП) визначається як динамічне 3D-середовище, що містить механічні перешкоди та різноманітні фізичні й інформаційні

(кібернетичні) впливи, які можуть зашкодити мобільним роботизованим засобам, ускладнити їх пересування або порушити комунікації [6]. Прикладами НП є великі зруйновані приміщення (енергетичні, транспортні чи промислові об'єкти), природні середовища з перешкодами (ліси, гори) чи акваторії, потенційно нашіповані вибухонебезпечними предметами [7]. Забезпечення стійкого зв'язку і успішного подолання таких просторів силами рою БПА є нетривіальною задачею, що потребує застосування спеціальних алгоритмів маршрутизації, уникнення зіткнень та координації рою. Водночас самі НП можуть включати кібератаки та електромагнітні завади (глушіння сигналів, спуфінг GPS тощо), які слід враховувати при проектуванні систем зв'язку [8].

Для дослідження подібних сценаріїв та відпрацювання алгоритмів на практиці створюються програмні симулятори. Відомі симулятори (OMNeT++, Gazebo, AirSim тощо) дозволяють відтворювати окремі аспекти поведінки рою дронів, але наразі відсутній універсальний інструмент, який би однаково добре моделював і комунікаційні мережі, і фізичну динаміку безпілотних систем [9, 10]. Тому розробка спеціалізованих систем моделювання під конкретні задачі – актуальне завдання. Важливо підкреслити, що запропонована в цій статті симуляційна система не призначена для реального застосування під час розмінування чи інших небезпечних операцій. Вона слугує виключно навчально-дослідницьким інструментом – середовищем для відпрацювання програмних рішень, перевірки алгоритмів та експериментального аналізу поведінки роєвих БПА до їх розгортання на практиці.

**Метою дослідження** є розроблення комплексної системи моделювання, що дозволяє тестувати та вдосконалювати методи подолання перешкод і забезпечення безперервних комунікацій роєм інтелектуальних безпілотних апаратів у небезпечних кіберфізичних просторах. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

проаналізувати сучасні підходи та існуючі моделі використання БПА для підтримки зв'язку в екстремальних ситуаціях, а також наявні симулятори безпілотних систем (їхні можливості та обмеження в контексті НП);

сформулювати вимоги до симулятора, який об'єднує фізичну модель середовища і мережеві аспекти, включно з врахуванням перешкод та кібер-впливів;

розробити моделі компонентів системи (середовище, перешкоди, впливи, дрони і рій) та архітектуру програмного симулятора на їх основі;

реалізувати прототип симулятора та провести експериментальні дослідження ефективності запропонованих алгоритмів розгортання мережі БПА в різних сценаріях НП.

## 1 Огляд проблематики та стану досліджень

Застосування безпілотних апаратів у небезпечних просторах. У останні роки з'явилося багато досліджень, присвячених використанню безпілотних систем для забезпечення зв'язку та збору інформації в екстремальних умовах. Зокрема, концепція літаючих ad hoc-мереж (FANET) передбачає, що дрони утворюють автономну бездротову мережу, обмінюючись даними між собою та з наземними вузлами. Такі мережі довели ефективність у військових і рятувальних операціях, при моніторингу довкілля, у сільському господарстві тощо. Оглядомі роботи відзначають необхідність розробки масштабованих і гнучких архітектур зв'язку для роєвих систем, здатних підтримувати різні конфігурації та завдання. Одним із ключових сценаріїв є використання БПА як ретрансляторів у зонах лиха, де дрони швидко створюють тимчасову мережу для координації рятувальників і передачі даних постраждалим. Наприклад, у роботі запропоновано мережу БПА на основі LiFi для аварійного об'єкта, а у дослідженні[11] запропоновано аналіз надійності роєвих сенсорних мереж для міського моніторингу. Для забезпечення зв'язку під час масових подій (концерти, мітинги) дрони розглядаються як тимчасові базові станції стільникового зв'язку. Зокрема, автори роботи описують алгоритм оптимального розгортання декількох дронів-BS для обслуговування великого скупчення користувачів, що дозволило суттєво покращити покриття і якість зв'язку в пікові періоди.

Особливу увагу дослідників привертають рої БПА та їхня самоорганізація. Рій – це група дронів, що діють спільно, координуючи свої дії для досягнення спільної мети. Перевагами роєвих систем є підвищена надійність (відмова одного апарата не призводить до провалу місії), ширше покриття та гнучкість переналаштування під нові задачі[12]. Водночас виникають виклики: розробка протоколів зв'язку між багатьма рухомими вузлами, уникнення зіткнень у тривимірному просторі, узгодження рішень великої кількості агентів у реальному часі[13,14]. Запропоновано різні підходи до координації: від біонатхнених алгоритмів (за аналогією з поведінкою птахів чи комах) до методів машинного навчання. Наприклад, у роботі[15] описано модель роєвої комунікації для пошуково-рятувальних місій, де використовуються

алгоритми кластеризації (K-means) та методи на основі випадкового лісу для оптимізації розміщення дронів і покращення потужності сигналу. Інші огляди узагальнюють архітектури управління роєм та окреслюють відкриті проблеми, зокрема забезпечення надійного обміну даними і справедливого використання каналу всіма дронами в мережі.

Симулятори та моделювання мереж БПА. Для перевірки алгоритмів зв'язку і маршрутизації у мережах дронів застосовуються мережеві симулятори загального призначення – передусім NS-3 та OMNeT++[16,17]. Вони підтримують моделювання бездротових ad hoc-мереж (зокрема, маневрених мереж UAV, відомих як MANET/FANET) і здатні імітувати передачу трафіку, відмови вузлів, змінну навантаженість каналу тощо. Дослідження показали, що ці інструменти дозволяють досить масштабовано відтворювати мережі з десятків і сотень вузлів[18]. NS-3 відзначається наявністю великої бібліотеки протоколів, а OMNeT++ – гнучкістю і зручним графічним інтерфейсом[19]. Проте їхнім недоліком є обмежена можливість моделювати фізичний рух дронів у 3D-просторі та враховувати реальні перешкоди середовища (будівлі, рельєф, перешкоди радіохвиллям)[20]. З іншого боку, фізичні симулятори (Gazebo, AirSim, MATLAB/Simulink тощо) дозволяють детально моделювати польотну динаміку, сенсорні дані (камери, LiDAR) і навіть алгоритми автопілота для безпілотників[21]. Такі засоби використовуються для відпрацювання навігації та керування, але зазвичай не моделюють навантаження мережевого трафіку.

Актуальним трендом є створення інтегрованих середовищ співсимуляції (co-simulation), що об'єднують кілька спеціалізованих симуляторів для одночасного моделювання різних аспектів системи[22]. Існують рішення поєднання NS-3 з Gazebo (для врахування затримок і втрат у радіоканалі під час 3D-руху дронів) або зв'язки OMNeT++ з SUMO (для одночасної симуляції руху транспорту і роботи мережі)[23]. Попри наявність таких інструментів, універсального симулятора роєвих БПА на сьогодні не існує[10]. Кожна платформа має свої обмеження, тому дослідники часто створюють власні тестові полігони під конкретні потреби[24]. У зв'язку з цим у даній роботі запропоновано спеціалізований симулятор, орієнтований на сценарії забезпечення зв'язку в небезпечних просторах. Він поєднує базове фізичне моделювання середовища з елементами мережевої моделі, надаючи гнучкі засоби налаштування параметрів. Нижче описано концептуальні моделі, закладені в основу системи, та її програмну архітектуру.

## 2 Моделі системи

При розробці симулятора формалізовано кілька моделей, що описують різні аспекти небезпечного простору і компонентів рою. Кожна модель визначає параметри, які можуть налаштовуватися користувачем для побудови конкретного сценарію.

*Модель середовища.* Небезпечний простір представлено у вигляді тривимірної області заданої форми і розмірів. В загальному випадку форма середовища може бути прямокутною (наприклад, кімната,

ангар) або довільною (фрагмент ландшафту, акваторії). Параметрами моделі є габарити простору (довжина, ширина, висота або радіус), а також візуальне відображення оточення. Середовище може містити межі (стіни, підлога, стеля), за які дрони не можуть вилітати. У симуляторі передбачено завантаження 3D-моделі рельєфу чи об'єкта як середовища або генерацію примітивного простору із заданими розмірами сцени.

*Модель перешкод.* Перешкоди – це об'єкти середині НП, які заважають руху дронів або блокують лінії зв'язку. Модель перешкод включає як статичні, так і динамічні об'єкти. Статичні перешкоди характеризуються фіксованим положенням та розмірами (наприклад, зруйновані колони, завали, стіни). Динамічні перешкоди можуть змінювати своє розташування або параметри з часом (наприклад, рухомі технічні засоби, транспорт або плаваючі об'єкти на воді). Кожна перешкода описується формою (геометричною моделлю), розмірами, початковими координатами та (для рухомих) траєкторією або законом руху. У системі підтримується завдання довільної кількості перешкод різних типів: їх можна розміщувати через конфігураційний файл або генерувати автоматично із заданими статистичними характеристиками (щільність, розподіл розмірів). При завантаженні сцени симулятор перевіряє колізії – чи не перетинаються об'єкти між собою, – і коригує розміщення при необхідності.

*Модель динамічних впливів.* Окрім твердих перешкод, у НП можуть бути присутні явища, що негативно впливають на видимість, фізичний стан та зв'язок. Модель динамічних впливів охоплює різного роду ефекти: задимленість, туман, заплинення, вогонь, пару, а також електромагнітні завади та кібератаки. Кожен вплив визначається типом, джерелом або площею поширення, інтенсивністю та законом динаміки (наприклад, туман може розсіюватися з часом, радіоперешкоди можуть з'являтися й зникати стрибкоподібно). У рамках симуляції фізичні ефекти (дим, туман) моделюються переважно графічно – через систему часток у рушії (що впливає на видимість сенсорів дронів). Інформаційні впливи реалізовані на рівні моделі зв'язку: вводиться коефіцієнт шуму на канал або імітуються раптові розриви з'єднання. Кібернетичний вплив може бути змодельовано як сценарій, коли один чи кілька дронів починають діяти некоректно (компрометовані вузли) або надходять помилкові дані про стан системи. Такі ситуації дозволять протестувати живучість алгоритмів рою за умов цілеспрямованих атак. В поточній реалізації симулятора динамічні впливи обмежені простим відключенням зв'язку при заданому рівні перешкод; у перспективі планується додати більш детальне моделювання (наприклад, поширення диму по області, модель задування радіосигналу тощо).

*Моделі БПА та рою.* У симуляторі кожен безпілотний апарат представлено як окремий агент з певними параметрами. До основних технічних характеристик моделі БПА належать: максимальна швидкість та висота польоту, запас енергії (ємність батареї), потужність в стаціонарному стані, потужність в

польоті, дальність зв'язку, набори сенсорів (камера, тепловізор, газоаналізатор тощо, залежно від сценарію). Також фіксуються габарити дрона для врахування при зіткненнях і мінімально допустима дистанція до інших дронів або інших перешкод. Підтримується декілька типів апаратів – наприклад, багатопропелерні БПЛА заданого розміру, безпілотні наземні роботи, надводні дрони – з різними характеристиками. Стартове розміщення дронів задається окремо (координати або депо старту). Інтелектуальні можливості агентів задаються через програмні “поведінкові компоненти” – функції, що визначають реакцію БПА на певні події (втрата зв'язку, виявлення нової перешкоди, низький заряд батареї тощо). Таким чином, моделюється простий рівень автономності: дрони можуть самостійно приймати локальні рішення (наприклад, облетіти перешкоду або повернутися на зарядку при розряді акумулятора). Рій БПА розглядається як множина агентів, що обмінюються повідомленнями і діють узгоджено. В моделі передбачено два підходи до координації: централізований (через виділений головний вузол або зовнішній центр керування) та децентралізований (кооперативний рій без лідера). У централізованому випадку один із дронів (або базова станція) збирає інформацію від усіх учасників і обчислює нові позиції та маршрути для них; у децентралізованому – кожен дрон виконує алгоритм координації самостійно, обмінюючись даними лише з сусідами. В обох випадках ключовим компонентом є алгоритм керування роєм – правило, за яким дрони коригують своє положення для підтримання зв'язності мережі. У прототипі реалізовано спрощений алгоритм: періодично кожен БПА порівнює рівень сигналу від сусідів і зміщується у бік того вузла, сигнал від якого найслабший (тобто “лагає дірку” у покритті мережі). Така поведінка аналогічна до рою бджіл, які реорганізуються при втраті окремих особин. Надалі планується випробувати й інші методи координації (на основі правил рою частинок, оптимізації роєм бджіл, Q-навчання тощо).

### 3 Архітектура симулятора

Розроблений симулятор має модульну архітектуру і реалізований мовою програмування Python. За візуалізацію тривимірного середовища та обрахунок фізичної взаємодії агентів відповідає ігровий рушій Panda3D. Вибір Python + Panda3D обумовлений гнучкістю налаштування поведінки агентів і можливістю швидкого прототипування алгоритмів керування роєм. Подібний підхід використовувався й іншими розробниками симуляторів – наприклад, у роботі Appaz наведено платформу навчального полігону для БПЛА з використанням Panda3D [25].

Архітектура складається з низки модулів, що відповідають моделям системи (рис. 1). Модуль середовища завантажує або генерує сцену заданих розмірів, встановлює моделі статичних об'єктів (рельєф, будівлі, межі тощо) та освітлення. Модуль перешкод опрацьовує конфігураційні дані про перешкоди: завантажує 3D-моделі або параметри примітивів (куб, сферу) для кожної перешкоди, задає їх початкове розташування.

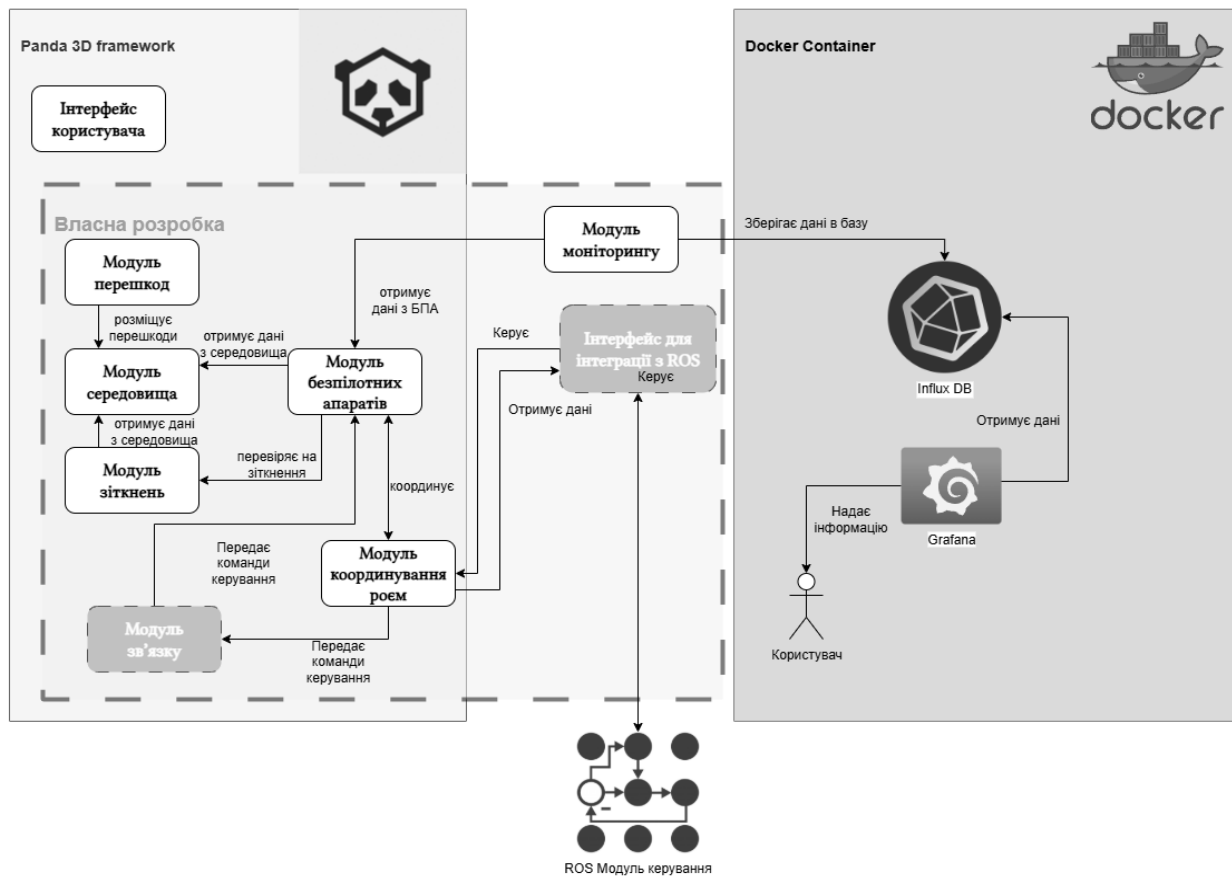


Рис. 1. Архітектура системи

Динамічні перешкоди створюються з прив'язаними функціями руху (наприклад, періодичне переміщення по заданій траєкторії). Модуль виявлення колізій (CollisionHandler) відстежує зіткнення дронів з перешкодами чи між собою, використовуючи механізми фізичного рушія. При зіткненні польоти відповідних дронів зупиняються або змінюється їхній маршрут (залежно від налаштувань сценарію – можна або моделювати “аварію” дрона, або примусити його облетіти перешкоду).

Модуль безпілотних апаратів відповідає за створення і параметризацію об'єктів-дронів у симуляції. Кожен агент ініціалізується з атрибутами, визначеними в моделі БПА: встановлюється 3D-модель дрона (умовна або детальна), маса, радіус дії сенсорів, запас заряду тощо. Рух дрона здійснюється або за попередньо розрахованою траєкторією, або згідно з алгоритмом керування роєм у реальному часі.

Модуль зв'язку (запланований до розробки) буде реалізувати обмін повідомленнями між агентами і моделювати фізичний канал. Якщо між двома агентами знаходиться перешкода, модуль на першому етапі розробки буде забороняти зв'язок. Також на другому етапі для радіоканалу враховуватимуться фонові завади і можливі перешкоди від кіберфізичних впливів.

Модуль координації роєм реалізує обраний алгоритм керування роєм. Він може працювати у двох режимах: централізовано – як окремий процес або потік на “наземному” вузлі, що збирає телеметрію від усіх дронів і обчислює для них нові цільові

точки; або децентралізовано – як метод, викликаний для кожного дрона локально з використанням лише часткової інформації. Цей модуль тісно пов'язаний з модулем зв'язку: у децентралізованому режимі кожен дрон має список сусідів (тих, з ким є радіозв'язок), і рішення про рух ухвалюється на підставі локальних показників (рівня сигналу, кількості сусідів, відстані до цільової точки тощо). У централізованому – глобальний контролер має повні дані про мережу та може виконувати, наприклад, оптимізацію розміщення всього рою (ця задача комбінаторна і вимагає значних обчислювальних ресурсів при великій кількості дронів).

Додатково заплановано інтеграцію з Robot Operation System (ROS)[26], модуль координації роєм заплановано як інтерфейс між системою моделювання і пристроєм або програмою керування роєм на основі ROS.

Конфігурація і інтерфейс. Для зручності створення сценаріїв, всі вхідні параметри системи задаються у вигляді текстових конфігураційних файлів. Зокрема, використано формати YAML та CSV: YAML-файл описує загальні параметри середовища і сценарію (розміри області, кількість дронів, режими координації, умови середовища та ін), тоді як CSV-файли можуть використовуватися для переліку координат перешкод чи шляхових точок. Такий підхід полегшує повторне використання сценаріїв і внесення змін без зміни коду. Графічний інтерфейс симулятора надає огляд сцени у 3D-режимі від третьої особи; користувач може обернути камеру, змінювати

масштаб та кут огляду. Доступна можливість взяти під контроль один з дронів ціль (обрати зі списку на клавіатурі), щоб перевірити роботу алгоритму керування роєм у реальному часі.

**Моніторинг і збір даних.** У ході симуляції система збирає телеметричні дані: координати всіх дронів, стан їх батарей, статистику зв'язності мережі (які вузли зв'язані, через які ретранслятори проходить маршрут від джерела до бази), затримки доставки повідомлень тощо. Для зберігання цих даних використано часово-рядну базу даних InfluxDB, у яку модуль моніторингу надсилає записи в реальному часі. Це дозволяє будувати графіки та метрики під час експерименту за допомогою Grafana – зручного інструменту візуалізації. Налаштовано кілька панелей Grafana, що відображають, наприклад, заряди батарей мережі з часом, рівень сигналу на різних ділянках, відстань, пройдену кожним дроном, тощо. Архітектура передбачає також можливість контейнеризації: всі компоненти (симулятор, СУБД, Grafana) можуть бути розгорнуті в середовищі Docker для спрощення встановлення та перенесення на різні платформи. За допомогою Docker-образу симулятор легко запускати на навчальних комп'ютерних класах або в хмарній інфраструктурі.

#### 4 Експериментальні дослідження

Експериментальні дослідження були проведені з метою оцінки ефективності та працездатності запропонованої системи моделювання у різних сценаріях. Для експериментів були використані спеціально розроблені конфігурації простору з перешкодами та запропоновані алгоритми пошуку маршрутів для БПА.

**4.1 Умови експериментів.** Для експериментів використовувався сценарій побудови ланцюжка зв'язку між двома заданими точками за допомогою

БПА які передають інформацію по технології Li-Fi. Між точками початку та фінішу розміщені перешкоди статичного типу, Побудова ланцюжка відбувається за алгоритмом A\* зі спрощенням шляху за допомогою функції видимості (прибрані всі проміжні точки розміщення які можуть бути прибрані без втрати видимості між точками). За сценарієм нові БПА з'являються на точці їх старту щойно точка звільняється від попереднього БПА, польоти відбуваються з урахуванням інших БПА в якості рухомих перешкод. Перед початком руху відбувається розрахунок траєкторії польоту, яка може бути змінена під час руху. Умовна максимальна дальність передачі сигналу була встановлена на рівні 8 метрів. Пряма дистанція між стартовою та фінішною точками: 57 м, Загальна довжина побудованого маршруту: 97.53 м, Кількість БПА: 15. Час пошуку маршруту для ланцюжка БПА не входить в час розгортання системи.

Виміри під час експериментів:

- довжина пройденого шляху усіма БПА;
- кількість сегментів траєкторій маршрутів БПА;
- час розгортання систем.

**4.2. Експеримент 1** (рис. 2). Особливості: Експеримент був проведений з використанням A\* зі спрощенням шляху за допомогою функції видимості для побудови шляху для БПА до найближчої точки ланцюжка. Для переміщення з точки базування до місця розташування в ланцюжку було використано метод розміщення по траєкторії ланцюжка (БПА дістаються найближчої точки ланцюжка до точки зльоту і розподіляються по ньому спочатку в сторону кінцевої точки потім початкової точки). Ця стратегія значно зменшує навантаження на модуль керування бо траєкторія відома заздалегідь, але в разі виявлення рухомих перешкод потрібні додаткові способи уникнення зіткнень і перебудови ланцюжка.

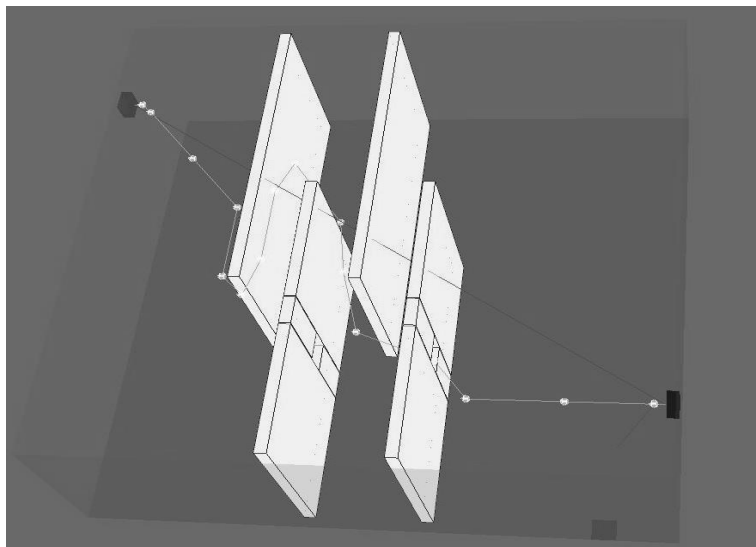


Рис. 2. Результат експерименту 1

Виміри:

- довжина пройденого шляху БПА: 791.14 м;
- кількість сегментів траєкторій дронів: 120;
- час розгортання системи: 22 сек.

**4.3. Експерименти 2, 3** (рис. 3). Особливості: Експерименти були проведені з використанням алгоритму A\* і жадібного перший-кращий (Greedy Best-First) зі спрощенням шляху за допомогою функції

видимості для побудови маршрутів БПА до їх місць розташування в ланцюжку, кожен БПА знаходить свій шлях індивідуально. Виміри:

- довжина пройденого шляху усіма БПА: 865 м;

- кількість сегментів маршрутів: 147;
- час розгортання системи: 1 год 40 хв 21 сек (A\*);
- час розгортання системи: 1 год 36 хв 34 сек (Greedy Best-First).

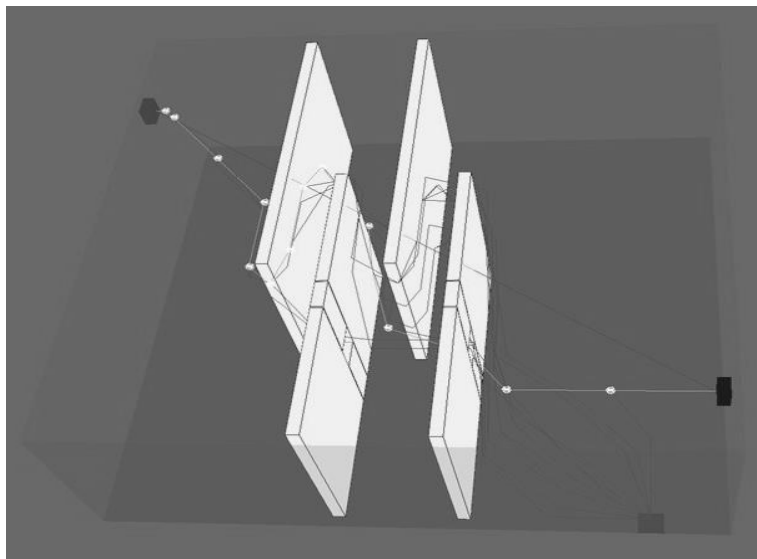


Рис. 3. Результати експерименту 2, 3

**4.4. Експеримент 4** (рис. 4). Особливості: Експеримент був проведений з використанням жадібного перший-кращий (Greedy Best-First) пошуку для

побудови маршрутів БПЛА до їх місць розташування в ланцюжку, кожен БПА знаходить свій шлях індивідуально.

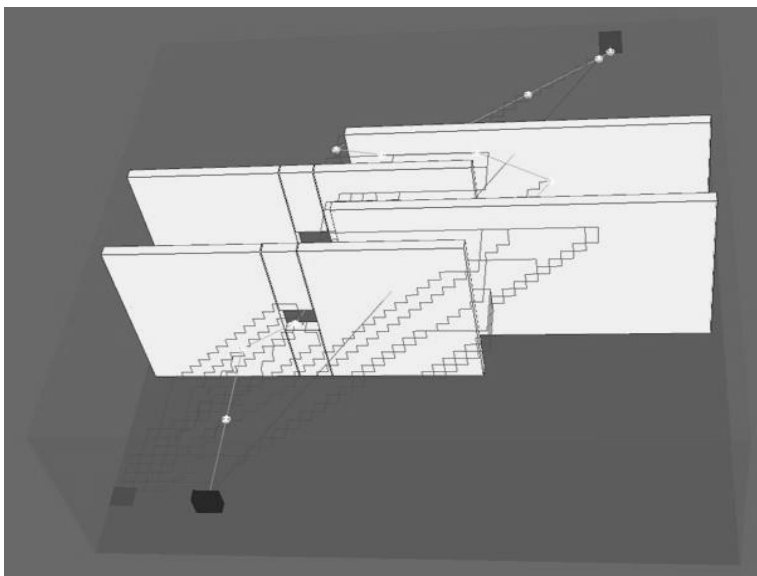


Рис. 4. Результат експерименту 4

Виміри:

- довжина пройденого шляху усіма БПЛА: 1316 м;
- кількість сегментів маршрутів: 1316;
- час розгортання системи: 1 год 43 хв 59 сек.

**4.5. Аналіз результатів експериментів.** Додатково був проведений Експеримент з використанням алгоритмів RRT та RRT\* але нажаль вони не впорались з поставленою задачею, ними було побудовано ланцюжок лише до середини а далі пошук не дав результатів. Найбільш вдалим є варіант розміщення БПЛА за допомогою вже побудованого маршруту

ланцюжка як зроблено в експерименті 1, але тут також є свої мінуси: БПЛА під час підміни БПА наприклад для повернення на перезарядку потрібно використовувати додаткові засоби для обходу БПА які займають свої місця в ланцюжку або все ж використовувати інший алгоритм для повернення на точку базування.

Результати експериментів 2 і 3 показують велику схожість алгоритмів побудови шляху через що результати дуже подібні один до одного, лише за рахунок меншої кількості обчислень Жадібний пошук перемагає по часу.

Експеримент 4 показує що алгоритм спрощення шляху за допомогою функції видимості дозволяє значно зменшити кількість дій (сегментів шляху) що зменшує складність подальших розрахунків і прискорює розгортання системи.

### Висновки та перспективи

У статті представлено комплексну освітньо-дослідницьку систему моделювання для відтворення сценаріїв подолання перешкод та організації комунікацій у небезпечних просторах із застосуванням роевих безпілотних апаратів. Система дозволяє детально моделювати ситуації, в яких традиційні мережі зв'язку недоступні або зруйновані, і досліджувати можливості рою БПА щодо швидкого відновлення інформаційного зв'язку.

Основні результати роботи можна підсумувати таким чином:

Проаналізовано сучасні технології та рішення у сфері використання безпілотних апаратів для забезпечення зв'язку в критичних ситуаціях. Показано, що роєві системи з розподіленим управлінням здатні забезпечити живучі комунікації у складних умовах, завдяки надлишковості вузлів і гнучкій перебудові мережі [11].

Запропоновано і реалізовано методологію моделювання НП, яка включає формалізацію простору, моделі статичних та динамічних перешкод, планування маршрутів обходу, оптимальне розташування ретрансляторів-БПА та алгоритми координації рою. Це дає змогу попередньо оцінити різні стратегії і вибрати найбільш ефективні рішення для відновлення мережі зв'язку.

Розроблено архітектуру системи моделювання, що поєднує 3D-рушій для фізичного моделювання та інструменти збору й аналізу даних. Використання Python/Panda3D спрощує імплементацію поведінки дронів, а інтеграція з InfluxDB/Grafana забезпечує зручний моніторинг результатів. Хоча поточна версія не підтримує детальну імітацію мережевих протоколів, вона дозволяє відтворювати широкий спектр сценаріїв без затрат на реальні польоти.

Експериментальні дослідження підтвердили працездатність системи та ефективність модифікованих алгоритмів пошуку шляхів. За рахунок спрощення траєкторій та продуманого порядку розгортання рою вдалось зменшити сумарну довжину маршрутів і кількість маневрів, що позитивно впливає на швидкість виконання завдання і економію заряду батарей дронів.

Показано, що симулятор може слугувати корисним інструментом як в освітньому процесі, так і в наукових дослідженнях. Він дає можливість студентам та розробникам роїв БПА безпечно випробувати різні підходи до розгортання мережі БПА, налаштувати параметри середовища, випробувати власні сценарії аварійних ситуацій та переконатися в надійності запропонованих рішень. Зокрема, можна проаналізувати питання енергоефективності (планування заряджання/заміни дронів), захисту від кібератак, оптимізувати кількість апаратів для покриття заданої території тощо.

Перспективи подальшого розвитку симулятора включають:

інтеграцію з операційною системою ROS для використання реальних контролерів дронів у контурі моделювання;

розширення бібліотеки датчиків (імітація бортових камер, тепловізорів, дистанційних датчиків);

додавання сценаріїв з кіберфізичним протистоянням (моделювання атак типу “глушіння” і засобів протидії ним на рівні програмного забезпечення БПА) [8];

покращення моделі середовища (рельєф місцевості, погодні умови) та реалізацію підтримки мережевих протоколів (наприклад, інтеграція модулів NS-3 для детального моделювання маршрутизації пакетів).

Усе це розширить сфери застосування симулятора і наблизить його до потреб як навчальних лабораторій з робототехніки та кібербезпеки, так і до прикладних завдань служб надзвичайних ситуацій. Врешті, виконане дослідження є внеском у розвиток інтелектуальних роєвих систем, здатних ефективно виконувати завдання у складних та небезпечних умовах, мінімізуючи ризики для людей.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Methods and Software Tools for Reliable Operation of Flying LiFi Networks in Destruction Conditions / H. Fesenko et al. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 17. P. 1–27. URL: <https://doi.org/10.3390/s24175707>
2. Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring / H. Fesenko et al. *Drones*. 2023. Vol. 7, no. 7. P. 1–28. URL: <https://doi.org/10.3390/drones7070409>
3. A UAV-Swarm-Communication Model Using a Machine-Learning Approach for Search-and-Rescue Applications / H. Khalil et al. *Drones*. 2022. Vol. 6, no. 12. P. 372(1–21). URL: <https://doi.org/10.3390/drones6120372>
4. Emergency Communication Service Solution Based on UAV Swarm / J. Jiang et al. *Theoretical and Natural Science*. 2023. Vol. 19, no. 1. P. 222–233. URL: <https://doi.org/10.54254/2753-8818/19/20230561>
5. Chandran I., Vipin K. Multi-UAV Networks for Disaster Monitoring: Challenges and Opportunities from a Network Perspective. *Drone Systems and Applications*. 2024. Vol. 1, no. 1. P. 1–28. URL: <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0079>
6. Optimizing Drone Deployment for Cellular Communication Coverage During Crowded Events / C. Boucetta et al. *Proc. of IEEE ICC*. 2019. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.1109/MILCOM47813.2019.9020748>
7. Champion M., Ranganathan P., Faruque S. UAV Swarm Communication and Control Architectures: A Review. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. 2019. Vol. 7, no. 3. P. 93–106. URL: <https://doi.org/10.1139/juvs-2018-0009>
8. A Review of Flying Ad Hoc Networks: Key Characteristics, Applications, and Wireless Technologies / F. Pasandideh et al. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, no. 18. P. 4459(1–28). URL: <https://doi.org/10.3390/rs14184459>
9. Oh D., Han J. Smart Search System of Autonomous Flight UAVs for Disaster Rescue. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 20. P. 6810. URL: <https://doi.org/10.3390/s21206810>
10. Energy Efficient UAV-Assisted Emergency Communication with Reliable Connectivity and Collision Avoidance / N. Sharvari et al. *arXiv preprint*. 2023. P. 13. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.16719>

11. Kimura T., Ogura M. Distributed Collaborative 3D-Deployment of UAV Base Stations for On-Demand Coverage. IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications, Toronto, ON, Canada, 6–9 July 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/infocom41043.2020.9155283>
12. Gadre D., Immanuel J. Utilizing Drones to Restore and Maintain Radio Communication in Disaster Scenarios. Wilderness & Environmental Medicine. 2022. Vol. 33, no. 2. P. 238–244. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wem.2021.11.007>
13. Kumar P., Singh Y., Sharma R. Swarm-Based UAV Communication Network: A Review of Challenges and Solutions. Procedia Computer Science. 2022. Vol. 198. P. 574–579. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.299>
14. Kovalyov A., Komarov M., Zabolotskiy A. Deployment of UAV Base Stations for Providing Wireless Coverage in Emergency Situations. Proc. of 2021 IEEE Int. Conf. on Emergency Science and Information Technology (ICESIT). 2021. P. 237–240. URL: <https://doi.org/10.1109/ICESIT53202.2021.9629112>
15. Han D., Xie J., Zhang Y. Fair Communications in UAV Networks for Rescue Applications. IEEE Internet of Things Journal. 2020. Vol. 7, no. 8. P. 7634–7646. URL: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2995618>
16. Fang Z., Savkin A. Strategies for Optimized UAV Surveillance in Various Tasks and Scenarios: A Review. Drones. 2024. Vol. 8, no. 5. P. 193(1–25). URL: <https://doi.org/10.3390/drones8050193>
17. Autonomous UAV Safety Oriented Situation Monitoring and Evaluation System / Z. Shi et al. Drones. 2024. Vol. 8, no. 7. P. 308(1–22). URL: <https://doi.org/10.3390/drones8070308>
18. UAV Applications for Monitoring and Management of Civil Infrastructures / A. Villarino et al. Infrastructures. 2025. Vol. 10, no. 5. P. 106(1–19). URL: <https://doi.org/10.3390/infrastructures10050106>
19. Robotic-Biological Systems for Detection and Identification of Explosive Ordnance: Concept, General Structure, and Models / G. Fedorenko et al. Radioelectronic and Computer Systems. 2023. 2. P. 143–159. URL: <https://doi.org/10.32620/reks.2023.2.12>
20. Nikolaiev M., Novotarskiy M. Comparative Review of Drone Simulators. Information, Computing and Intelligent Systems. 2024. No. 4. P. 79–98. URL: <https://doi.org/10.20535/2786-8729.4.2024.300614>
21. Koenig N., Howard A. Design and Use Paradigms for Gazebo, an Open-Source Multi-Robot Simulator. Proc. of 2004 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2004. P. 2149–2154. URL: <https://doi.org/10.1109/IROS.2004.1389727>
22. Varga A., Hornig R. An Overview of the OMNeT++ Simulation Environment. Proc. of 1st Int. Conf. on Simulation Tools and Techniques (SIMUTools). 2008. P. 1–10. URL: <https://dx.doi.org/10.4108/ICST.SIMUTOOLS2008.3027>
23. Baidya S., Shaikh Z., Levorato M. FlyNetSim: An Open Source Synchronized UAV Network Simulator Based on ns-3 and Ardupilot. Proc. of 21st ACM Int. Conf. on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. 2018. P. 37–44. URL: <https://doi.org/10.1145/3242102.3242118>
24. Kudelski M., Gambardella L., Di Caro G. RoboNetSim: An Integrated Framework for Multi-Robot and Network Simulation. Robotics and Autonomous Systems. 2013. Vol. 61, no. 5. P. 483–496. URL: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.01.003>
25. Annaz F. UAV Testbed Training Platform Development Using Panda3D. Industrial Robot – Int. J. 2015. Vol. 42, no. 5. P. 450–456. URL: <https://doi.org/10.1108/IR-01-2015-0017>
26. Robot Operating System 2: Design, Architecture, and Uses in the Wild / S. Macenski et al. Science Robotics. 2022. Vol. 7, no. 66. P. eabm6074(1–8). URL: <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abm6074>

Received (Надійшла) 12.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.08.2025

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Остапенко Леонід** – аспірант кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна;

Ostapenko Leonid – PhD Student at the Department of Computer Systems, Networks, and Cybersecurity, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [l.ostapenko@student.csn.khai.edu](mailto:l.ostapenko@student.csn.khai.edu); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0006-1590-2500>.

**Харченко Вячеслав Сергійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна;

**Kharchenko Vyacheslav** – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head at the Department of Computer Systems, Networks, and Cybersecurity, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [v.kharchenko@csn.khai.edu](mailto:v.kharchenko@csn.khai.edu); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-5352-077X>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=22034616000>.

#### **System for simulation of overcoming obstacles and organizing communications in hazardous environments: structure and experimental evaluation**

Leonid Ostapenko, Vyacheslav Kharchenko

**Abstract.** The paper presents a comprehensive simulation system for overcoming obstacles and organizing communications in hazardous environments using UAV swarms. The proposed models of environment, obstacles, dynamic influences, and UAVs enable the reproduction of scenarios in destroyed or hard-to-reach indoor areas, considering static and dynamic objects as well as cyber-physical impacts. The simulator architecture is implemented in Python with the Panda3D engine and integrated with data collection and analysis tools (InfluxDB, Grafana, Docker), providing flexible configuration of parameters and reproduction of diverse scenarios. The paper presents experimental results demonstrating the efficiency of routing algorithms (A\*, Greedy Best-First, etc.) and swarm coordination for deploying a Li-Fi-based communication chain. It is shown that the system serves as a valuable research and training tool for testing algorithms, analyzing swarm reliability, evaluating energy efficiency, and resilience to cyber impacts. Future development perspectives include integration with ROS, extension of the sensor library, and modeling of network-level communication protocols.

**Keywords:** simulation, unmanned aerial vehicles, UAV swarm deployment, hazardous environment, routing, paths, obstacle avoidance, communications, Li-Fi, Panda3D, cyber-physical impacts.

Д. В. Сальніков, О. Г. Васильченко, Д. Г. Караман

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## ОПТИМІЗАЦІЯ МНОЖЕННЯ КВАНТОВАНИХ ОДНОБІТНИХ МАТРИЦЬ ДЛЯ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ

**Анотація.** У зв'язку з активним розвитком та вдосконаленням систем штучного інтелекту останнім часом обробка природної мови стала однією з найбільш актуальних та затребуваних задач. Засоби та алгоритми на базі великих мовних моделей, що забезпечують обробку природної мови та перетворення мови в текстові дані, активно застосовуються для реалізації методів автоматизації різноманітних повсякденних задач, а також систем обслуговування та оперативної взаємодії з людиною. Для швидкого та адекватного опрацювання природної мови, з врахуванням синтаксичних та національних особливостей необхідно використовувати досить складні мовні моделі. Але великі мовні моделі потребують значних обсягів пам'яті та обчислювальної потужності, що ускладнює їх повсякденне використання на пристроях з обмеженими ресурсами, таких як мобільні пристрої з автономним живленням, вбудовані системи та пристрої Інтернету речей. Таким чином, оптимізація алгоритмів роботи мовних моделей та зниження апаратних витрат на їх реалізацію є як ніколи актуальною задачею. Для пришвидшення виконання та зменшення необхідних об'ємів пам'яті використовують алгоритми квантування коефіцієнтів мовних моделей. В даній роботі сформульовано проблеми, що виникають під час виконання квантованих операцій множення матриць, розглянуто популярні підходи до реалізації алгоритму множення матриць на графічних прискорювачах, та реалізовано оптимізоване за швидкістю виконання ядро множення квантованих 1-бітних матриць.

**Ключові слова:** квантовані операції, множення матриць, трансформери, великі мовні моделі, CUDA, GPU, LLM, Pytorch, нейронні мережі.

### Вступ

Великі мовні моделі (LLM, Large Language Models) є однією з найзначніших інновацій в галузі штучного інтелекту і обробки природної мови. Вони здатні аналізувати, розуміти і генерувати змістовний текст, що робить їх надзвичайно корисними для виконання різних завдань, пов'язаних з обробкою природної мови. Однак, щоб забезпечити ефективну роботу таких моделей, необхідно вирішити низку технічних проблем, пов'язаних з виконанням матричних операцій. Матричні операції є ключовим компонентом в архітектурі нейронних мереж, особливо в трансформерах, які є основою багатьох сучасних LLM, таких як GPT-3 і BERT.

Одна з основних проблем матричних операцій для великих мовних моделей полягає у складності процесу їх обчислення. Матричні операції, як-от матричні множення та обчислення власних векторів, потребують значних обчислювальних ресурсів, особливо коли йдеться про обробку великих обсягів даних. До прикладу, у [1] описано основи архітектури трансформерів, які використовують матричні операції для обробки послідовностей даних. Іншою важливою проблемою є не достатньо ефективне використання пам'яті. Великі мовні моделі потребують значної кількості оперативної пам'яті для зберігання проміжних результатів матричних обчислень. Це стає особливо критичним у випадках, коли модель має обробляти довгі послідовності тексту або великі обсяги даних. Докладно з переліком основних методів оптимізації використання пам'яті у великих мовних моделях можна ознайомитися у роботі [2].

Також варто звернути увагу на питання обчислювальної потужності та енергоспоживання. Виконання складних матричних операцій вимагає високої обчислювальної потужності, що призводить до значного енергоспоживання. Це піднімає питання про екологічну стійкість та вартість експлуатації

великих мовних моделей. Автори роботи [3] приводять дослідження аспектів енергоефективності та обчислювальної потужності сучасних нейронних мереж.

Окрім технічних аспектів, важливим є питання масштабування матричних операцій. Зі зростанням розмірів мовних моделей і збільшенням обсягів даних, які вони обробляють, зростає потреба у більш ефективних методах масштабування обчислень. У [4] проведено аналіз різних підходів до масштабування мовних моделей і його впливу на ефективність обчислень. Одним із напрямків вирішення цих проблем є розробка спеціалізованого апаратного забезпечення, такого як графічні процесори (GPU) та тензорні процесори (TPU, Tensor Processing Units), які оптимізовані для виконання матричних операцій. У [5] надаються особливості та переваги використання TPU для виконання матричних обчислень у нейронних мережах. Ще одним важливим напрямком є оптимізація алгоритмів для матричних операцій. Використання сучасних алгоритмів та методів оптимізації може значно знизити обчислювальну складність та підвищити ефективність матричних обчислень. У [6] розглянуто способи оптимізації матричних операцій у контексті глибоких нейронних мереж.

Таким чином, вирішення наведених проблем матричних операцій є ключовим аспектом для розвитку та розширення сфер використання великих мовних моделей. Поєднання апаратних і програмних методів дозволяє забезпечити ефективну роботу мовних моделей, знижуючи обчислювальну складність, енергоспоживання та обсяги необхідної пам'яті. Це відкриває нові можливості для застосування великих мовних моделей у різних галузях: медицині, освіті, бізнесі та виробництві, а також використання у кіберфізичних системах та пристроях з обмеженими ресурсами, таких як автономні роботи, вбудовані системи та пристрої Інтернету речей.

Вирішення цих викликів вимагає тісної співпраці між дослідниками, розробниками апаратного забезпечення та інженерами-програмістами. Лише за умови комплексного підходу можливо досягти значних успіхів у оптимізації матричних операцій та забезпечити подальший розвиток великих мовних моделей. Подальші дослідження у цій галузі допоможуть виявити нові методи та підходи, що сприятимуть підвищенню ефективності і надійності мовних моделей, а також пошуку шляхів для їх реалізації для використання у сучасних кіберфізичних системах та пристроях Інтернету речей.

**Основною метою статті** є розробка та дослідження ефективності оптимізованого за швидкістю виконання реалізації ядра множення квантованих 1-бітних матриць з урахуванням оптимальних алгоритмів множення матриць на графічних прискорювачах.

### Множення матриць з квантованими коефіцієнтами

Більшість конкурентних нейронних моделей перетворення послідовностей мають структуру енкдер-декодер. У такій архітектурі енкдер відображає вхідну послідовність символів  $(x_1, \dots, x_n)$  у послідовність безперервних представлень  $z = (z_1, \dots, z_n)$ . На основі  $z$  декодер генерує вихідну послідовність символів  $(y_1, \dots, y_m)$  по одному елементу за раз. На кожному кроці модель працює в авторегресивному режимі, використовуючи раніше згенеровані символи як додаткове введення для прогнозування наступного символу. Трансформер реалізує цю архітектуру, використовуючи багатопшаровий механізм формування уваги та покомпонентні повнозв'язні шари як у енкдері, так і в декодері.

Функція уваги визначається як відображення запиту та набору пар «ключ-значення» у вихідний вектор, де запит, ключі, значення та вихідні дані представлені у вигляді матриць. Вихідна матриця обчислюється як зважена сума значень, де ваги визначаються за допомогою функції сумісності між запитом і відповідним ключем. На практиці функція уваги обчислюється одночасно для цілого набору запитів, які об'єднуються в матрицю  $Q$ . Аналогічно, ключі та значення організуються у матриці  $K$  і  $V$  відповідно. Схема обчислення функції уваги зображена на рис. 1. Роботи схеми можна описати виразом (1). Вираз включає в себе декілька операцій множення матриць. Зазвичай такі операції є одними з найбільш оптимізованих, оскільки задача множення матриць дуже часто є першочерговим об'єктом розв'язку в області високопродуктивних операцій.

$$Att(Q, K, V) = softmax\left(Q \times K^T / \sqrt{d_k}\right) \times V, \quad (1)$$

де  $Q$ ,  $K$  та  $V$  — це матриці запитів, ключів та значень, відповідно, а  $d_k$  — це розмірність кожного вектора ключа/запиту.

Завдяки можливості розпаралелювати множення матриць, сучасні графічні процесори (GPU) або спеціалізовані пристрої, такі як TPU, можуть значно пришвидшити обчислення, виконуючи безліч операцій одночасно.

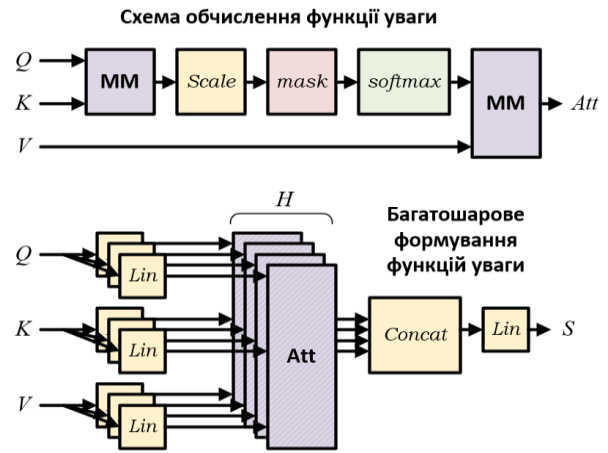


Рис. 1. Схема обчислення функції уваги

На основі виразу (1) можна зробити висновок, що сама модель трансформатора не є складною в обчислювальному плані. Проте для підвищення точності отримуваних результатів вона має багаторівневу структуру. Таким чином, складність моделі зростає із зростанням кількості рівнів уваги моделі.

Із збільшенням якості роботи нейромережевих моделей зростає також і кількість обчислень, необхідних для їх функціонування, а також об'єм пам'яті для зберігання результатів обчислення та вагових коефіцієнтів моделі. Сучасні графічні прискорювачі мають від 80 Гб (Nvidia H100) до 141 Гб (Nvidia H200) оперативної пам'яті, що придатна для зберігання даних, коефіцієнтів та результатів обчислень, тоді як персональні комп'ютери та мобільні телефони обмежені 16-64 Гб. В той самий час, лише тельки об'єм вагових коефіцієнтів топології великої мовної моделі GPT-4 перевищує 300 Гб. Оскільки кількість оперативної пам'яті є суттєвим обмежуючим фактором сучасних обчислювальних засобів, закономірно виникає необхідність стиснення даних якими оперують нейронні мережі – квантування. Квантування — це метод стиснення моделей, який перетворює ваги та коефіцієнти активації великих мовних моделей із формату представлення з високою точністю у формат з меншою точністю. Це означає зміну типу даних на такий, що містить менше інформації. Типовим прикладом є кодування 32-бітних чисел з плаваючою комою на певному діапазоні у 8-бітні цілі числа, або компресія зображень, що передаються мережею для відображення на веб-сторінках.

Зменшення кількості бітів, необхідних для представлення ваг або коефіцієнтів активації моделі, суттєво скорочує її загальний розмір. Як наслідок, квантування дозволяє зменшити обсяг пам'яті, необхідний для зберігання моделі, знизити вимоги до сховища та підвищити енергоефективність великих мовних моделей. Квантування великої мовної моделі (LLM) також знижує її вимоги до засобів обчислення, що дає змогу запускати її на менш потужному апаратному забезпеченні, зберігаючи при цьому прийнятний рівень продуктивності. Більшість сучасних нейронних мереж можуть бути квантовані для зменшення об'ємів пам'яті, що використовується, без суттєвого зниження точності роботи алгори-

тму. Алгоритми для квантування представляють коефіцієнти у вигляді співвідношення (2):

$$Coef = Val \times Scale + Bias . \quad (2)$$

Параметри *Scale* та *Bias* вибирають один на певний об'єм даних залежно від задачі в якій він використовується. Основні алгоритми квантування розглянуті в [7–10]. Оскільки зберігання параметрів та коефіцієнтів в стислом вигляді є необхідним для більшості сучасних алгоритмів нейронних мереж, постає задача ефективного виконання операції множення матриць з різними типами даних.

Одним з перспективних, на поточний момент, видів квантування є метод квантування, описаний у роботах [11–14]. Автори пропонують використання так званого посттренувального квантування для створення моделей з екстремально малою кількістю бітів для подання значень ваг та коефіцієнтів активації. Ця методика знижує точність представлення ваг та активацій, що суттєво зменшує вимоги до пам'яті та обчислювальних ресурсів LLM. Поточна тенденція полягає в поступовому переході від 16-бітних форматів до ще нижчих розрядностей, наприклад 4-бітних. Хоча посттренувальне квантування не можна назвати оптимальним рішенням, воно широко використовується в LLM для практичного застосування у різних галузях. Останні дослідження у сфері 1-бітних архітектур [11] відкривають перспективний напрям для зниження вартості використання LLM без значних втрат продуктивності. Типові мовні моделі оперують 16-бітними числами з плаваючою комою (FP16 або BF16), а їхня основна обчислювальна складність пов'язана з операціями множення матриць. Основна частина витрат припадає на додавання та множення чисел з плаваючою комою. Натомість, у запропонованому рішенні множення матриць виконується лише за допомогою операцій цілочисельного додавання, що дозволяє

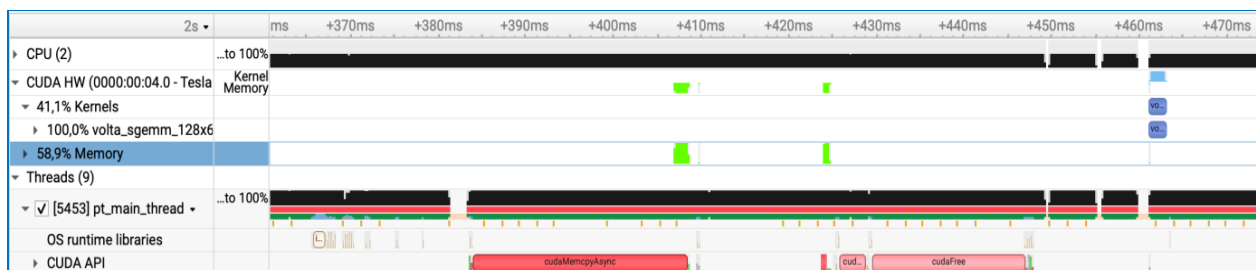
зменшити енергоспоживання на порядки. Зменшення енергоспоживання безпосередньо сприяє прискоренню обчислень. Окрім обчислювальних витрат, значним фактором є передача параметрів моделі з віддаленої пам'яті (DRAM) до пам'яті внутрішнього прискорювача (SRAM) під час виконання запитів. Спроби збільшити обсяг SRAM для покращення пропускної здатності призводять лише до значного зростання вартості та технологічної складності виготовлення обчислювача.

Порівняно з моделями повної точності, 1-бітні LLM мають суттєво знижене споживання пам'яті як з точки зору обсягу, так і пропускної здатності. Це значно скорочує витрати часу та ресурсів на завантаження ваг із DRAM, що, у свою чергу, сприяє швидшому та ефективнішому виконанню запитів. Такий екстремальний вид квантування дає не тільки високі показники стисання, а й не знижує суттєво якість роботи мовної моделі.

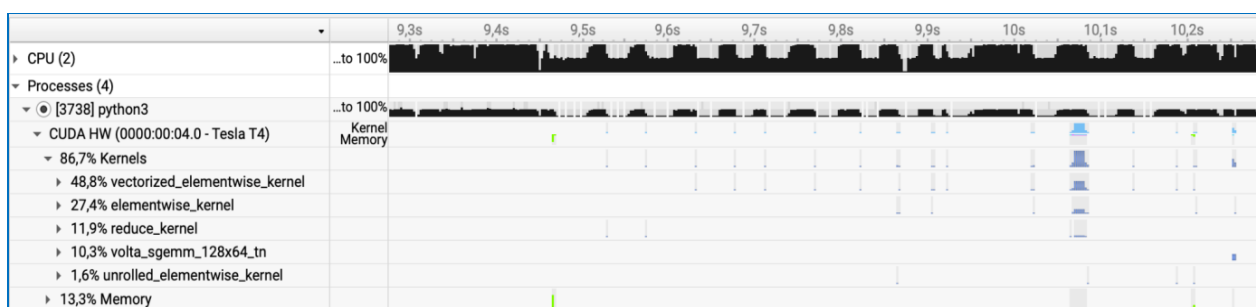
Тим не менше з точки зору швидкості виконання подібний підхід призводить до ускладнення алгоритму розрахунків. Наприклад, рівняння деквантування з урахуванням бітових операцій виглядатиме таким чином:

$$Coef = ((Val \& mask) \gg \log(mask)) \times Scale + Bias . \quad (3)$$

Еталонна реалізація нейромережевого шару використовує примітиви бібліотеки PyTorch, що дає змогу швидко реалізувати та випробувати алгоритм але не є оптимальним. Зокрема з результатів профайлінгу (рис. 2 та табл. 1) видно, що для розрахунків використовується стандартне ядро `volta_sgemmm_128x6` та операції зсуву, які виконуються процесором системи. Ядра множення матриць CUDA (зокрема `volta_sgemmm_128`) сильно оптимізовані для досягнення найбільшої можливої швидкодії. Проте вони спроектовані для розрахунків в межах одного типу даних — `float32`, `bfloat`, `hfloat` і т. п.



а



б

**Рис. 2.** Результати профайлінгу роботи алгоритму за допомогою Nsight Compute: а – операції трансферу даних між процесором та GPU; б – ядра GPU використані для реалізації шару

Таблиця 1 – Кількісні результати профайлінгу роботи алгоритму

Назва	CPU, мс	CUDA, мс	CUDA середнє	Викликів
aten::mm	615.19	10539.00	1.054 мс	10000
volta_sgemm_128x64_tn	0.00	10525.00	1.054 мс	10000
native::elementwise_kernel 1	0.00	1424.00	71.196 мкс	20000
aten::mul	221.29	731.01	73.101 мкс	10000
native::elementwise_kernel 2	0.00	731.01	73.101 мкс	10000
aten::sub	246.81	724.06	72.406 мкс	10000
aten::add	228.42	699.87	69.986 мкс	10000
aten::copy_	1368.00	540.07	6.751 мкс	80000
native::unrolled_elementwise_kernel	0.00	540.07	6.751 мкс	80000
aten::bitwise_and	4829.00	263.67	3.296 мкс	80000
native::vectorized_elementwise_kernel	0.00	263.67	3.296 мкс	80000
aten::rshift_	2203.00	222.69	3.181 мкс	70000

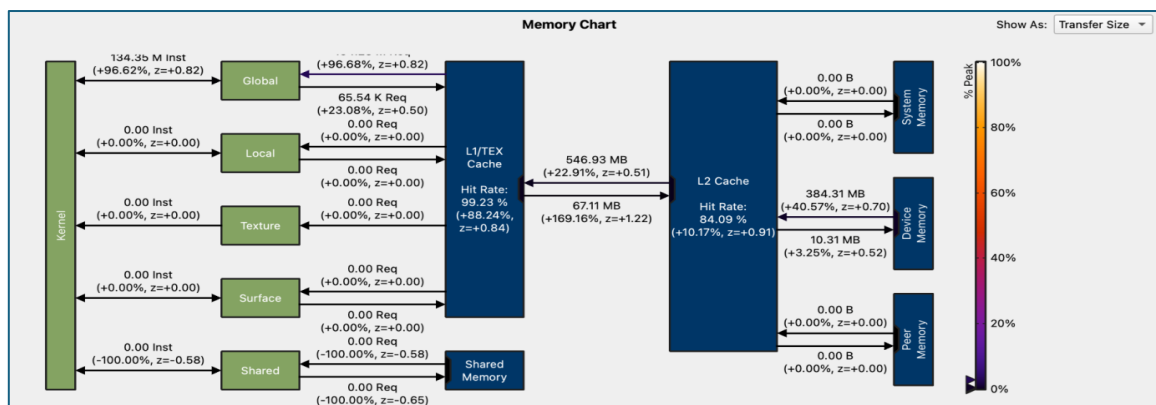
Більше того сучасні графічні прискорювачі не мають апаратної підтримки цілих типів даних менше 8 біт. Через це використовується операція розпаковки даних з однобітного формату в один з форматів з рухомою комою. Така операція використовує операції з накладення бітових масок та зсуву, після чого відбувається множення на Scale та додавання Bias. Якщо ці операції виконує процесор системи, дані потім необхідно скопіювати до пам'яті графічного прискорювача. Таким чином, не зважаючи на те що алгоритм множення матриць є добре оптимізованим, більшу частину часу квантований шар моделі виконує операції перетворення однобітних коефіцієнтів у 32-бітні числа з рухомою комою.

### Методи оптимізації алгоритму

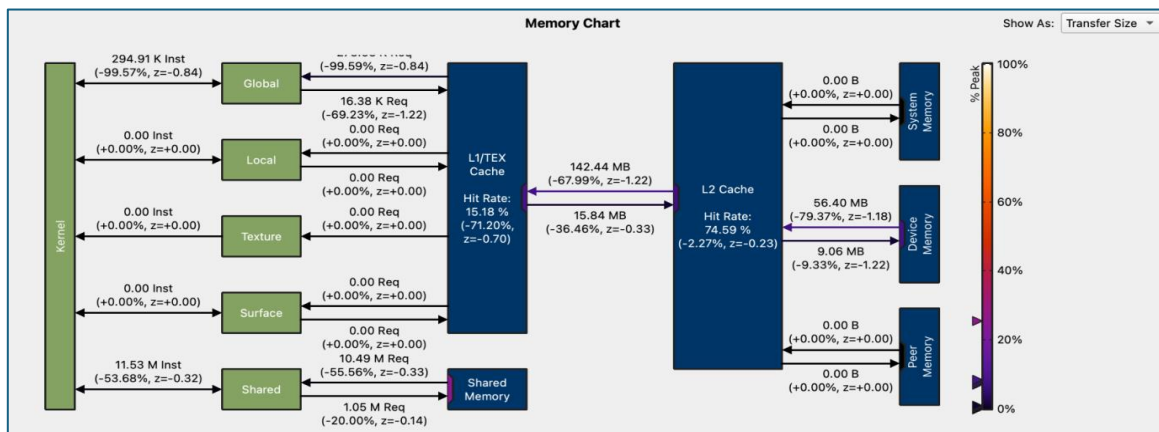
Питання оптимізації обчислень специфічних для нейромережних алгоритмів розглянуто в роботах [15, 16].

Слід зазначити, що на транзакції пам'яті з головної системи до пристрою та назад, а також на виконання операцій розпаковки даних у формат з рухомою комою витрачається суттєвий відсоток часу роботи алгоритму.

Враховуючи це, навіть не оптимізований алгоритм множення матриць, що не виконує такі трансфери даних є більш оптимальним з точки зору швидкості виконання (рис. 3).



а



б

Рис. 3. Статистика транзакцій між пам'яттю та ядром при множенні матриць:

а – статистика транзакцій пам'яті не-оптимізованого ядра; б – статистика транзакцій пам'яті оптимізованого ядра

Алгоритм множення матриць є досить простим з точки зору розрахунків. Як видно з візуалізації на рис. 4, кожен рядок матриці  $A$  множиться на кожен стовпець матриці  $B$ , результати накопичуються та зберігаються в матрицю результату  $C$ .

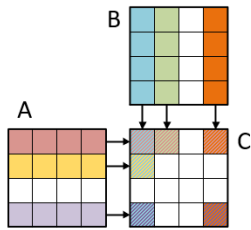


Рис. 4. Візуалізація алгоритму множення матриць

У випадку, що розглядається, матриця  $A$  має тип float32, в той час як матриця  $B$  – тип 1-bit представлений у тензорі uint8. З точки зору оптимізації програмного забезпечення, найбільш проблемною частиною є організація доступу до пам'яті параметрів алгоритму. Сучасні контролери пам'яті забезпечують певну оптимізацію послідовних транзакцій зчитування та запису. Таким чином, необхідно організувати процес завантаження для мінімізації повторних операцій з пам'яттю та максимізації послідовного доступу. Для додаткової оптимізації було використано кеш пам'яті прискорювача. Як показано на рис. 5 кеш пам'яті GPU організована як  $N$  банків пам'яті розміром  $M$ .

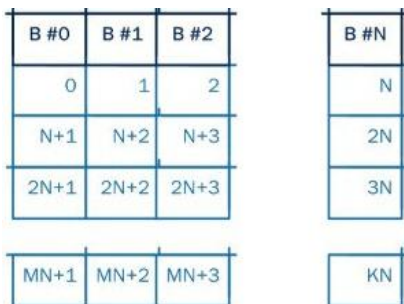


Рис. 5. Структура кеш пам'яті GPU

Виконання декількох операцій зчитування різними SM-процесорами одночасно призводить до затримок обробки, у той час як зчитування/запис з/до різних банків виконується за 1 такт. Отже, в запропонованому рішенні реалізовано алгоритм множення тайлами, де кожен рядок матриці  $A$  множиться на декілька стовпців матриці  $B$ ; 32 елементи рядку зчитуються та зберігаються до кеш пам'яті; кожен SM-процесор GPU використовує окремий банк пам'яті; проміжні результати зберігаються до

кеш-пам'яті; наприкінці алгоритму виконується синхронізація SM-процесорів та збереження результату до НВМ-пам'яті.

Як видно з рис. 5, даний підхід дозволяє суттєво знизити кількість транзакцій до зовнішньої пам'яті (б) порівняно з наївним алгоритмом (а). Слід зазначити що, кількість звернень до кеш-пам'яті при цьому збільшується, однак саме висока швидкість доступу до кешу як раз і забезпечує суттєве прискорення алгоритму. Реалізований алгоритм досягає 1.7 TFLOPS/s з теоретично можливих 2.9 TFLOPS/s, а отже залишається суттєвий простір для подальшої оптимізації обчислювального ядра.

Результати оцінки тривалості виконання операцій для запропонованого ядра у порівнянні з бібліотекою HQQ представлені на рис. 6.



Рис. 6. Тривалість виконання квантованого ядра множення матриць

## Висновки

Ядра множення матриць із квантованими параметрами широко використовуються в галузі машинного навчання, зокрема при реалізації великих мовних моделей, завдяки високій обчислювальній ефективності та оптимальному використанню пам'яті.

Розроблене в цій роботі ядро множення матриць із квантованими входами є оптимальнішим як за часом обчислень, так і за апаратними витратами, досягаючи продуктивності класичних ядер множення матриць CUDA, що працюють із єдиним форматом даних для всіх операндів. Крім того, запропоноване ядро зменшує потребу в пам'яті, оскільки відсутня необхідність у зберіганні розпакованих коефіцієнтів у пам'яті пристрою.

Подальші дослідження будуть зосереджені на реалізації підтримки інших типів даних, спеціалізації алгоритму, а також підвищенні швидкодії за рахунок використання векторних операцій.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

- Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser L., Polosukhin I. "Attention Is All You Need," arXiv:1706.03762, Computation and Language (cs.CL); Machine Learning, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.1706.03762.
- Shoeybi M., Patwary M., Puri R., LeGresley P., Casper J., Catanzaro B. "Megatron-LM: Training Multi-Billion Parameter Language Models Using Model Parallelism," arXiv:1909.08053, Computation and Language, 2020. DOI: 10.48550/arXiv.1909.08053.
- Patterson D., Gonzalez J., Le Q., Liang C., Munguia L.-M., Rothchild D., So D., Texier M., Dean J. "Carbon Emissions and Large Neural Network Training," arXiv:2104.10350, Computation and Language, 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2104.10350.
- Kaplan J., McCandlish S., Henighan T., Brown T. B., Chess B., Child R., Gray S., Radford A., Wu J., Amodei D. "Scaling Laws for Neural Language Models," arXiv:2001.08361, Machine Learning (cs.LG); Machine Learning (stat.ML), 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2001.08361>; DOI: 10.48550/arXiv.2001.08361.

5. Jouppi N. P., Young C., Patil N., Patterson D. "In-Datcenter Performance Analysis of a Tensor Processing Unit," arXiv:1704.04760, Hardware Architecture (cs.AR); Machine Learning (cs.LG); Neural and Evolutionary Computing (cs.NE), 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1704.04760.
6. Cao Y., Romero J., Olson J. P., Degroote M., Johnson P. D., Kieferová M., Kivlichan I. D., Menke T., Peropadre B., Sawaya N. P. D., Sim S., Veis L., Aspuru-Guzik A. "Quantum Chemistry in the Age of Quantum Computing," Chemical Reviews, vol. 119 (19), ISSN 1520-6890, 2019, pp. 10856–10915. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00803.
7. Zhou Y., Moosavi-Dezfooli S.M., Cheung N. M. and Frossard P. "Adaptive quantization for deep neural network." In Proceedings of the 32th AAAI Conference on Artificial Intelligence (Vol. 32, No. 1), 2018. DOI: 10.1609/aaai.v32i1.11623.
8. Kodali R. K., Upreti Y. P., Boppana L. "A Quantization Approach for the Reduced Size of Large Language Models." 16th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST), Krabi, Thailand, 2024, pp. 144-148, DOI: 10.1109/KST61284.2024.10499664.
9. Krishnamoorthi R. "Quantizing deep convolutional networks for efficient inference: A whitepaper." arXiv:1806.08342, Machine Learning (cs.LG); Computer Vision and Pattern Recognition (cs.CV); 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1806.08342.
10. Elias F., Ashkboos S., Hoefler T., Alistarh D. "Gptq: Accurate post-training quantization for generative pretrained transformers," arXiv:2210.17323, Machine Learning (cs.LG), 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2210.17323.
11. Shuming Ma, Hongyu Wang, Lingxiao Ma, Lei Wang, Wenhui Wang, Shaohan Huang, Li Dong, Ruiping Wang, Jilong Xue, Furu Wei. "The Era of 1-bit LLMs: All Large Language Models are in 1.58 Bits," arXiv:2402.17764 (preprint), Computation and Language (cs.CL); Machine Learning (cs.LG), 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2402.17764.
12. Chee J., Cai Y., Kuleshov V., De Sa C. "QuIP: 2-bit quantization of large language models with guarantees," arXiv:abs/2307.13304, Machine Learning (cs.LG); Computation and Language, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2307.13304.
13. Ji Lin, Jiaming Tang, Haotian Tang, Shang Yang, Xingyu Dang, Song Han. "AWQ: activation-aware weight quantization for LLM compression and acceleration," arXiv:abs/2306.00978, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2306.00978.
14. Chetlur S., Woolley C., Vandermersch P., Cohen J., Tran J., Catanzaro B., Shelhamer, E. "cuDNN: Efficient primitives for deep learning," arXiv:1410.0759, Neural and Evolutionary Computing (cs.NE); 2014. DOI: 10.48550/arXiv.1410.0759.
15. Kumar R., Negi K. C., Sharma N. K., Gupta P. "Deep Learning-Driven Compiler Enhancements for Efficient Matrix Multiplication." Journal of Computers, Mechanical and Management, 3(2), 2024, pp.08-18. DOI: 10.57159/gadl.jcmm.3.2.240122.
16. Xiao G., Yin C., Zhou T., Li X., Chen Y., Li, K. "A Survey of Accelerating Parallel Sparse Linear Algebra." ACM Computing Surveys, 56 (1), 2023. Article No.: 21, pp. 1-38. DOI: 10.1145/3604606.

Received (Надійшла) 17.03.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.07.2025

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Сальніков Дмитро Валентинович** – кандидат технічних наук, старший викладач автоматички та управління в технічних системах, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

**Dmytro Salnikov** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Automation and Control in Technical Systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [dmytro.salnikov@kphi.edu.ua](mailto:dmytro.salnikov@kphi.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0007-6201-5370>;  
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57225126629>.

**Васильченко Олег Георгійович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент автоматички та управління в технічних системах, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

**Oleg Vasylychenkov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automation and Control in Technical Systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [oleh.vasylychenkov@kphi.edu.ua](mailto:oleh.vasylychenkov@kphi.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-0969-2248>;  
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57225129501>.

**Караман Дмитро Григорович** – старший викладач автоматички та управління в технічних системах, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

**Dmytro Karaman** – Senior Lecturer at the Department of Automation and Control in Technical Systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [dmytro.karaman@kphi.edu.ua](mailto:dmytro.karaman@kphi.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-7252-3172>;  
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202228956>.

#### Optimization of 1-bit quantized matrix multiplication for large language models

Dmytro Salnikov, Oleg Vasylychenkov, Dmytro Karaman

**Abstract.** With the rapid development and improvement of artificial intelligence systems, natural language processing has recently become one of the most relevant and in-demand tasks. Tools and algorithms based on large language models (LLMs) that enable natural language processing and speech-to-text conversion are actively used for automating various everyday tasks, as well as for service systems and real-time human interaction. Efficient and accurate natural language processing, taking into account syntactic and linguistic peculiarities, requires highly complex language models. However, large language models demand significant memory and computational resources, making their widespread use challenging on resource-constrained devices such as battery-powered mobile devices, embedded systems, and Internet of Things (IoT) devices. Thus, optimizing language model algorithms and reducing hardware costs for their deployment is an increasingly pressing issue. To accelerate execution and minimize memory requirements, quantization algorithms for language model parameters are employed. This work formulates key challenges associated with performing quantized matrix multiplication operations, explores popular approaches to implementing matrix multiplication algorithms on GPUs, and presents an optimized high-performance kernel for 1-bit quantized matrix multiplication.

**Keywords:** quantized operations, matrix multiplication, transformers, large language models, CUDA, GPU, LLM, PyTorch, neural networks.

Т. Г. Фесенко, Д. В. Сергеев, О. М. Долгополов, І. Д. Сергородцев, М. В. Жук

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ СТВОРЕННЯ МУЗИЧНО-ІГРОВИХ ПРОЕКТІВ: БІБЛІОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ

**Анотація. Актуальність.** Розвиток інформаційних технологій (ІТ) сприяє виникненню нових форм творчої взаємодії, зокрема у сфері музично-ігрових проєктів, що поєднують музику, ігрові механіки та цифрові технології. Інтеграція ІТ у такі продукти створює інноваційні можливості для навчання, реабілітації та розваг, що актуалізує потребу в систематизації знань у цій галузі. **Об'єкт дослідження.** наукові публікації, присвячені використанню інформаційних технологій для реалізації музично-ігрових проєктів. **Мета статті:** виявлення публікацій, що формують знання про сучасні ІТ для створення музично-ігрових проєктів. **Результати дослідження.** У статті проведено бібліометричний аналіз 414 документів із бази Scopus за запитом “music AND game AND projects” (1995–2025 pp.). Виділено 24 предметні області, об'єднані у шість галузей знань. Встановлено, що найбільше публікацій належить до комп'ютерних наук. Ключові слова проаналізовано та структуровано в чотири семантичні кластери: технології розробки музичних ігор, освітні мультимедійні платформи, психологічні й терапевтичні аспекти, а також соціально-економічні ефекти. Виявлено недостатню представленість напрямів, пов'язаних із робототехнікою, мультисенсорними системами та музичною терапією в ігровому середовищі. **Висновки.** Отримані результати дозволяють розширити уявлення про наукову структуру теми музично-ігрових проєктів та виявити напрями подальших досліджень, зокрема в освітньо-реабілітаційній сфері та при розробці інтерактивних ІТ-продуктів. Сфера використання отриманих результатів: освітні, культурні, реабілітаційні та креативні цифрові платформи, що базуються на музично-ігрових взаємодіях.

**Ключові слова:** музично-ігрові проєкти; інформаційні технології (ІТ); бібліометричний аналіз; бібліометричні данні; бібліометрична карта; кластеризація ключових слів.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Інформаційні технології (ІТ) дедалі активніше використовуються для створення музичних ігрових проєктів, що поєднують у собі цифрову музику, інтерактивність та ігрові механіки. Зростання інтересу розробників, дослідників і користувачів до інтеграції сучасних ІТ-рішень у музичні ігрові продукти відкриває нові можливості для творчості, навчання та розваг.

Основою для музично-ігрових проєктів є різноманітні ІТ: цифрові аудіоінструменти, ігрові рушії, штучний інтелект (Artificial Intelligence, AI), хмарні сервіси, мережеві технології. Цифрові аудіоробочі станції (Digital Audio Workstation, DAW) та платформи як Unity3D дозволяють створювати інтерактивні музичні середовища, де музика адаптується до дій користувача, створюючи унікальний досвід. AI (зокрема генеративні моделі) автоматизувати процеси композиції, генерації музичних тем, аранжування та навіть створення персоналізованих музичних треків у реальному часі, що значно розширює творчі можливості розробників [1–4].

Важливим напрямом є освітній потенціал музичних ігрових проєктів. Застосування віртуальної (Virtual Reality, VR) та доповненої реальності (Augmented Reality, AR) у поєднанні з інтерактивними іграми створює ефективні середовища для навчання музиці, підвищує мотивацію та залученість учнів, а також сприяє розвитку музичних навичок у доступній і захопливій формі [5]. Впровадження ігрових механік у навчальні процеси дозволяє адаптувати контент під індивідуальні потреби користувачів, забезпечуючи зворотний зв'язок і стимулюючи креативність [6, 7].

Інфраструктурні аспекти, зокрема оптимізація мережних алгоритмів, забезпечення віддаленого

доступу до ресурсів і використання гід- та хмарних технологій, є критично важливими для стабільної роботи музичних ігрових платформ. В роботах [8–12] висвітлюються методи підвищення живучості комп'ютерних мереж, управління ресурсами хмарної інфраструктури та забезпечення безпеки даних, що безпосередньо впливає на якість і надійність музичних ігрових сервісів. Крім того, управління музично-ігровими проєктами вимагає комплексного підходу, що враховує технічні, організаційні та якісні аспекти [13, 14].

Для систематизації знань у сфері застосування інформаційних технологій для реалізації музично-ігрових проєктів широкого застосування набуває бібліометричний аналіз [15, 16]. Цей метод дозволяє виявити ключові тенденції, визначити провідних авторів, інституцій та країни, а також простежити динаміку розвитку тематики у часі. Використання бібліометричних платформ, таких як Scopus, Web of Science та Google Scholar, сприяє підвищенню якості наукових досліджень і формуванню ефективних стратегій розвитку галузі. Огляд публікацій про застосування ІТ інструментів реалізації музично-ігрових проєктів дозволив нам окреслити цілі цього дослідження.

**Мета і завдання дослідження.** Метою даного дослідження є виявлення публікацій, що формують знання про сучасні ІТ для створення музично-ігрових проєктів. Для досягнення цієї мети були сформульовані наступні завдання:

- здійснити пошук публікацій, що висвітлюють можливості та результати використання ІТ для створення музично-ігрових проєктів;
- проаналізувати публікації, розміщені у науково-метричній базі Scopus, із використанням інструментів візуалізації;
- розробити бібліографічні карти ключових слів із використанням VosViewer Software.

## Методологія збору та структуризації даних

Бібліометрія є важливим інструментом для проведення кількісного аналізу наукової діяльності. Вона ґрунтується на використанні статистичних показників, що дозволяють простежити публікаційну динаміку в окремих галузях знань. Завдяки бібліометричним дослідженням можна оцінити еволюцію наукових тем та напрямів у часовому вимірі. З точки зору епістемології, ця методика дозволяє виявити, як змінювалися й розвивалися наукові дисципліни. Бібліометричний підхід також дає змогу встановити взаємозв'язки між авторами, науковими установами та найбільш цитованими роботами в конкретній сфері. До того ж, він слугує інструментом для ідентифікації потенційних дослідницьких колективів і виявлення майбутніх наукових трендів.

Для відбору документів було використано наукометричну базу даних Scopus. Пошук у базі даних здійснювався в полі «Назва статті, Анотація, Ключові слова (Article title, Abstract, Keywords)» із використанням термінів «music AND game AND projects». Враховувався період публікації – від 1995 до 01 червня 2025 року. Поле «Предметна область (Subject Area)» показало, що контекст вибраних документів потрапляє до 24 сфер знань (рис. 1). Найбільш значна кількість (228 документів) стосується комп'ютерних наук. Для подальшого аналізу 24 сфери знань були згруповані в 6 галузей знань:

1) технічні науки (Computer Science, Engineering, Energy, Materials Science, Chemical Engineering) – 269 документів;

2) соціальні науки (Social Sciences, Economics, Econometrics and Finance, Business, Management and Accounting, Psychology, Decision Sciences) – 128 документів;

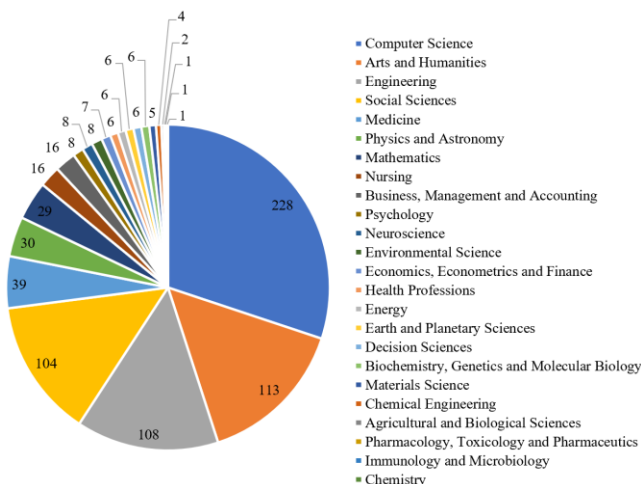


Рис. 1. Репрезентативність публікацій у предметних галузях, обраних за запитом «music AND game AND projects» у наукометричній базі даних Scopus

3) природничі науки (Physics and Astronomy, Mathematics, Environmental Science, Earth and Planetary Sciences, Chemistry) – 65 документів;

4) медицина та охорона здоров'я (Medicine, Nursing, Health Professions, Pharmacology, Toxicology and Pharmaceutics) – 46 документів;

5) біологічні науки (Neuroscience, Biochemistry, Genetics and Molecular Biology, Immunology and Microbiology, Agricultural) – 17 документів.

6) гуманітарні науки (Arts and Humanities) – 113 документів.

За допомогою контент-аналізу було виявлено, що тематика музично-ігрових проєктів охоплена усіма галузями знань, а саме: технічними – [17–22]; соціальними – [23–28]; природничими – [29–34]; медициною та охороною здоров'я – [35–37]; біологічними – [38, 39]; гуманітарними науками – [40–45]. При цьому було виявлено, що база даних Scopus деякі документи про музично-ігрові проєкти відносять до кількох галузей знань, зокрема:

– доповідь на конференції про нові форми взаємодії користувачів (люди похилого віку), дизайн та оцінку інтерфейсу гри DanceMove, що інтегрує налаштовану хореографію, адаптивні рівні складності та вибір музики [18] – двох галузей знань (технічні науки, медицина і охорона здоров'я);

– доповідь на конференції представляє проєкт «Gamelan Metaverse», створений за допомогою технології віртуальної реальності (Virtual Reality, VR) з підтримкою захоплюючого 3D-середовища [25] – трьох галузей знань (технічні, соціальні науки, медицина та охорона здоров'я);

– доповідь на конференції про проєкт, присвячений вивченню та реалізації систем мультимодальної взаємодії для генерації, обробки та контролю звуку й музики і представлений у музеї в Парижі у вигляді інтерактивної інсталяції [30] – трьох галузей знань (гуманітарні, технічні, природничі науки);

– доповідь на конференції про використання соціальних допоміжних роботів для когнітивної реабілітаційної терапії людей з інвалідністю [36] – двох галузей знань (технічні науки, медицина та охорона здоров'я);

– стаття про інтелектуальний пристрій та алгоритми, які дозволяють ігрові застосунки доповнювати ароматами та текстовими субтитрами [38] – трьох галузей знань (біологічні, природничі, технічні науки);

– доповідь на конференції про ігровий інтерфейс, який дозволяє неекспертам створювати експресивні відтворення існуючої музики (не володіючи інструментом), а досвідченим музикантам – дозволяє експериментувати з обраним твором, не опановуючи нот твору [42] – трьох галузей знань (гуманітарні, технічні та природничі науки).

У полі «Тип документа (Document type)» показано, що вибрані документи структуровані наступним чином: доповіді на конференціях – 169, статті – 122, розділ книг – 56, огляди конференцій – 31, книги – 21, огляди – 10, редакційних статей – 4, короткий огляд – 1. В результаті перевірки усі (414) документи були відібрані для подальшого аналізу.

Згідно з полем «Країна/територія (Country/territory)», автори документів представляють 57 країн, у тому числі: Сполучені Штати (95 документів), Велика Британія (53 документів), Італія (31 документи), Канада (20 документів), Іспанія (12 документів), Швеція (14 документів), Німеччина (13 документів).

### Високорівневий аналіз бібліометричних даних

За результатами аналізу виявлено, що для публікації результатів досліджень про музично-ігрові проекти автори надавали перевагу: Lecture Notes in Computer Science Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics (16 документів); Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression (11 документів); ACM International Conference Proceeding Series (10 документів); Journal of Sound and Music in Games (документів). Найбільш цитовані документи опубліковану у таких джерелах, як: в Self-Expression [30] – 262 цитувань; в Computers and Education [4] – 139 цитувань; в Africa [31] – 137 цитувань; в ACM International Conference Proceeding Series [5] – 134 цитувань і [32] – 129 цитувань; в Interactions [6] – 100 цитувань.

Географія досліджень про музично-ігрові проекти пов'язана з 160 організаціями, більшість з яких є науковими та академічними установами (101), а 59 – інші організації, зокрема: SoftServe (ІТ-компанія з глобальним впливом, спеціалізується на розробці програмного забезпечення та консалтингу), ARGUS DATA INSIGHTS Schweiz AG (міжнародна компанія з моніторингу медіа та аналітики), Deerpact AG (швейцарська компанія в галузі штучного інтелекту й ІТ-рішень), Schibsted Media Group (один із найбільших медіаконгломератів Скандинавії), FOCUS TV (німецька медіа/телевізійна компанія), Interactive Media Institute (американська організація, що поєднує ІТ і психологію), PublicVR (американська компанія, яка займається VR/AR для освіти, науки, музеїв), Netural GmbH (австрійська цифрова агенція, яка виконує проекти у сфері UX/UI, веб та мобільних рішень). Приналежність авторів до цих організацій підтверджується різною кількістю документів (від 1 до 7). Università degli Studi di Genova (Генуя, Італія) має 7 документів, дев'ять академічних і наукових установ мають по 4 документи: The Royal Institute of Technology (Стокгольм, Швеція), Luleå University of Technology (Лулео, Швеція), Goldsmiths, University of London (Лендон, Велика Британія), National University of Singapore (Сінгапур, Сінгапур), Consiglio Nazionale delle Ricerche (Rome, Italy), University of Cincinnati (Цинциннаті, Сполучені Штати), Sant'Anna Scuola Universitaria Superiore Pisa (Піза, Італія), Mines Paris - PSL (Париж, Франція), University of Alberta (Едмонтон, Канада).

Важливим елементом бібліометричного аналізу є частота використання ключових слів. З 414 документів було відфільтровано 160 ключових слів. Для подальшого аналізу було виключено слова: Article, Clinical Article, Current, Priority Journal, United States, Research, Pilot Projects, Pilot Study, Controlled Study, Case-studies, Surveys, Questionnaire. Також, були згруповані ключові слова, подібні за значенням: Adolescent/Students/College Students/Young Adult (у 16 документах), Adult/Female/Male (у 55 документах), Aged/Aged, 80 And Over/Older Adults (у 12 документах),

Child/Children (у 13 документах), Computer Programming/Programming (у 18 документах), Design/Design And Development/Software Design (у 27 документах), Digital Music/ Computer Music (у 33 документах), Education Computing / Learning Systems (у 19 документах), Education/ Teaching/ Engineering Education (у 44 документах), E-learning/Computer Aided Instruction (у 21 документі), Game Design/ Game Development (у 16 документах), Game Music/Games Musics (у 10 документах), Game/Games/ Computer Games (у 49 документах), Human Computer Interaction/Interaction/ Interaction Design (у 36 документах), Human/Humans (у 57 документах), Immersion/ Immersive (у 10 документах), Mobile Devices/ Smartphones/Smart Phones (у 13 документах), Multimodal/Multi-modal (у 8 документах), Music/ Music Composition (у 68 документах), Open Source/Open Source Software/Open Systems (у 14 документах), Psychology/ Psychological Aspect (у 9 документах), Robotics/Robots (у 12 документах), Social Networking (online)/ Social Interactions/Facebook/ Youtube/Internet (у 28 документах), Video Game /Video Games /Video-games (у 42 документах).

Такі інструменти, як «хмара» (рис. 2) та «діаграма» (рис. 3), візуалізують значущість термінів, які стосуються музично-ігрових проектів на основі кількості згадувань в аналізованих документах. Слабовидимі слова (3-d Environments, Application Programming Interfaces (API), Architectural Design, Art, Automatic Generation, Awareness, Background Musics, Biofeedback, Composition) показують, що в існуючих дослідженнях недостатню наукову розробленість відповідного питання.

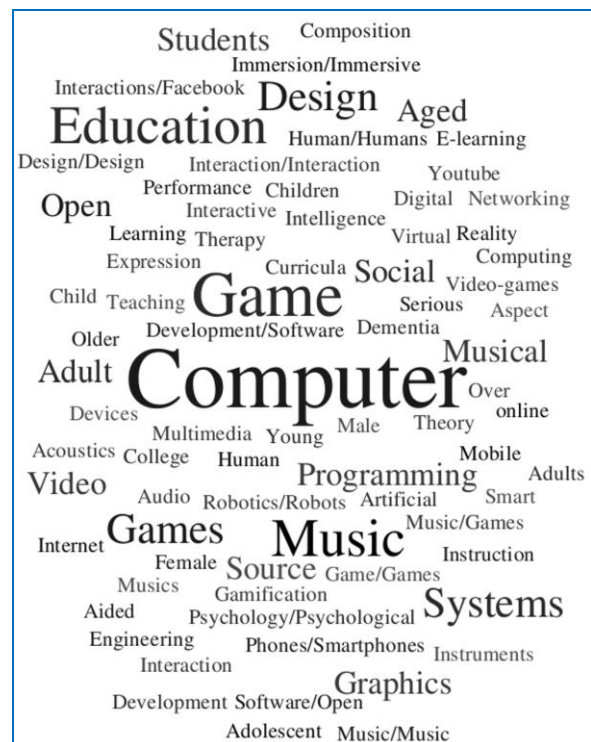
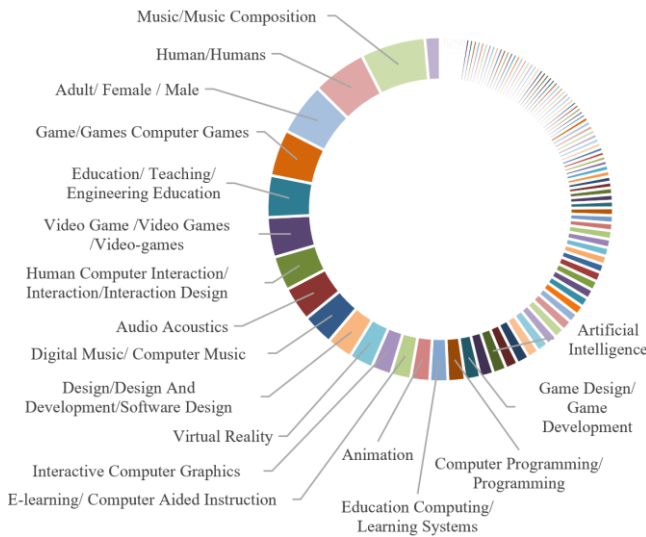


Рис. 2. Хмара ключових слів у документах про музично-ігрові проекти у Scopus (згенерована WordItOut)



**Рис. 3.** Діаграма частоти ключових слів у документах про музично-ігрові проекти в Scopus (сформована із використанням MS Excel)

**Бібліометричні карти та аналіз кластерів ключових слів**

Бібліометричний аналіз даних було проведено за допомогою програмного забезпечення VOSviewer версії 1.6.20. Для експорту даних про вибрані 414 документів з бази даних Scopus у форматі CSV було вибрано такі налаштування:

- інформація про цитування (Author(s), Document title, Year, EID, Source title, Volume, issues, pages, Citation count, Source & document type, Publication stage, DOI, Open access);
- бібліографічна інформація (Affiliations, Serial identifiers (e.g. ISSN), PubMed ID, Publisher, Editor(s), Language of original document, Correspondence address, Abbreviated source title);
- анотація та ключові слова (Abstract, Author keywords, Indexed keywords);
- інформація про фінансування (Number, Acronym, Sponsor, Funding text);
- інша інформація (Tradenames & manufactur-

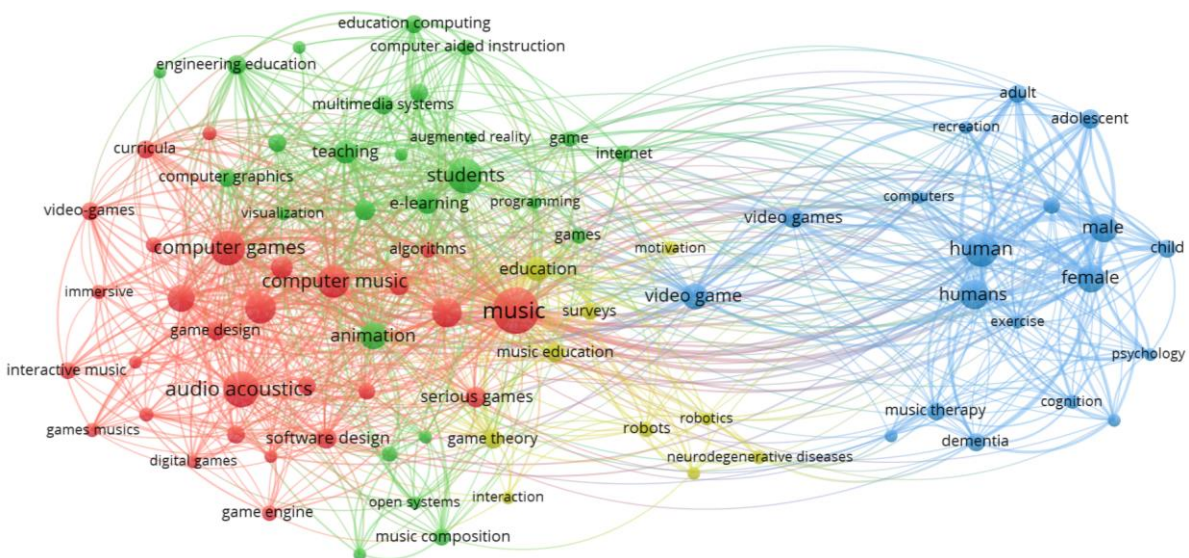
ers, Accession numbers & chemicals, Conference information, Include references).

Для створення карти на основі бібліографічних даних у програмі VOSviewer встановлено такі параметри: тип аналізу – Co-occurrence; одиниця аналізу – All keyword; метод підрахунку – Full counting; мінімальна кількість входжень ключового слова – 5, при цьому 8 ключових слів (article, pilot projects, pilot study, priority journal, united states, clinical article, case-studies, research) виключено. В результаті скринінгу програма VOSviewer відібрала 85 ключових слів, для кожного з яких розрахувала кількість та силу (потужність) згадувань. Аналіз дозволив виявити, що найчастіше використовуваним ключовим словом було «music» з 79 взаємозв'язками і 60 згадувань, далі йдуть «human/humans», «female/male», «computer games» та «audio acoustics». У таблиці 1 наведено 10 найпопулярніших ключових слів із їх силою (потужністю) згадувань.

**Таблиця 1 – Десять найчастіше згадуваних ключових слів у публікаціях про музично-ігрові проекти**

Ранг	Ключове слово	Кількість згадувань	Сила згадувань
1	music	60	283
2	human/humans	57	482
3	female/male	46	430
4	computer games	35	158
5	audio acoustics	36	122
6	virtual reality	25	117
7	computer music	29	113
8	human computer interaction	21	110
9	video games/video game	32	195
10	animation	20	90

Бібліометрична карта (рис. 4) містить 84 ключових слів, структурованих у чотири кластера, включаючи «computer games», «music» (у Кластері 1), «game/games» (у Кластері 2), «video game/video games game» (у Кластері 3) та «game theory», «music education» (у кластері 4):



**Рис. 4.** Бібліометрична карта кластерів (елементів) ключових слів у документах про музично-ігрові проекти у Scopus

– Кластер 1 (червоний) – 28 ключових слів (algorithms, artificial intelligence, audio acoustics, behavioral research, **computer games**, computer, music, curricula, design, digital games, game design, game development, game engine, gameplay, games musics, gamification, human computer interaction, immersive, interactive computer graphics, interactive music, **music**, musical expression, performance, serious games, software design, three dimensional computer graphics, user interfaces, video-games, virtual reality);

– Кластер 2 (зелений) – 26 ключових слів (animation, augmented reality, computer aided instruction, computer graphics, computer operating systems, computer programming, e-learning, education computing, engineering education, **game, games**, internet, learning systems, machine learning, mobile devices, multimedia systems, music composition, musical instruments, open source software, open systems, programming, social interactions, social networking (online), students, teaching, visualization);

– Кластер 3 (синій) – 19 ключових слів (adolescent, adult, aged, child, cognition, computers, dementia, exercise, female, human, humans, male, music therapy, occupational therapy, priority journal, psychology, questionnaire, recreation, **video game, video games**);

– Кластер 4 (гірчичний) – 10 ключових слів (economic and social effects, education, **game theory**, interaction, motivation, **music education**, neurodegenerative, diseases, robotics, robots, surveys).

На бібліометричній карті (рис. 4) позначено 1020 взаємозв'язків між 84 елементами, загальна сила взаємозв'язків – 2258.

Кластерний аналіз ключових слів (елементів) показав, що:

– Кластер 1 об'єднує технології розробки ігрового програмного забезпечення з музичним контентом і включає: алгоритми, штучний інтелект, тривимірну графіку, гейміфікаці., інтерфейси користувачів та віртуальну реальність;

– Кластер 2 представляє концепцію застосування музично-ігрових технологій та їх програмну реалізацію в освітній галузі (викладання, програмування, комп'ютерна підтримка навчання, соціальна взаємодія студентів у цифровому середовищі, інклюзивна та міждисциплінарна освіта);

– Кластер 3 відображає взаємозв'язок між психологією, педагогікою, ІТ для оцінки впливу ігор і музики (музична терапія, трудова терапія) на фізичні, когнітивні, психологічні характеристики людей різних вікових і гендерних груп;

– Кластер 4 створює синергію соціальних, економічних і мотиваційних аспектів функціонування музично-ігрових проєктів шляхом застосування теорії ігор, мотивації, освіти, соціальних ефектів, роботизованих рішень.

Застосування фільтра «Keywords» в Scopus дозволило вибрати документи, що стосуються кожного кластера. В таблиці 2 показано документи з найбільшою кількістю цитувань в кожному кластері.

Аналіз взаємозв'язків між ключовими словами «Computer games»– «Video games» – «Robotic» (рис.

5) показав, що відсутність інтеграції між музично-ігровими системами (іграми, застосунками) та робототехнікою на бібліометричній карті «підсвічують» дослідницькі прогалини у публікаціях. Можна припустити, що застосування музично-ігрових ІТ продуктів у реабілітаційних програмах з елементами робототехніки поки недостатньо представлений у публікаціях, які індексуються Scopus.

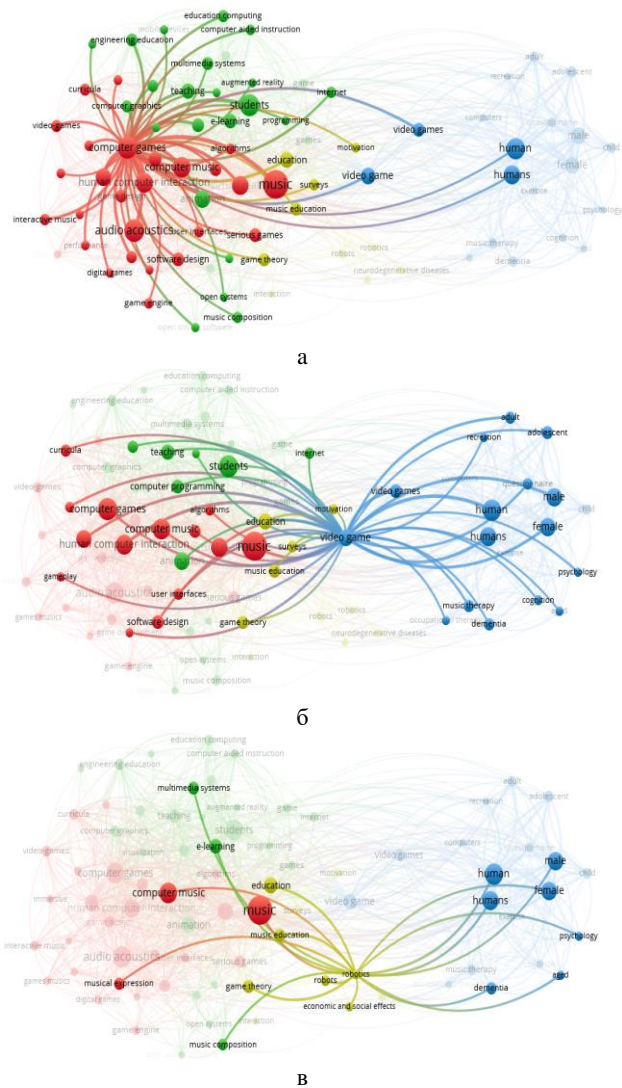


Рис. 5. Бібліометрична карта слів: а – «Computer games», б – «Video games», в – «Robotic»

На рисунку 6 представлено карту кластерів ключових слів (елементів) документів про музично-ігрові проєкти у часі (за роками). Примітно, що до 2020 року в документах здебільшого використовувалися елементи, включені до Кластера 1 (musical expression), Кластера 2 (multimedia systems, mobile devices, teaching, computer graphics), Кластера 3 (adolescent, recreation, child), Кластера 4 (education, game theory, interaction). Протягом останніх трьох років (2023–2025) домінуючими стали документи, що містять елементи: video-games, games music (Кластер 1); machine learning, computer aided instruction, game, programming (Кластер 2); psychology (Кластер 3); economic and social effects (Кластер 5).



ру комп'ютерних наук (228 документів), що свідчить про технологічну домінують в досліджуваній тематичі.

Контент-аналіз публікацій показав, що музично-ігрові проекти є предметом інтересу різних галузей знань, низка публікацій охоплює декілька дисциплін одночасно (наприклад, технічні науки та медицина, або гуманітарні науки і природничі). Географія досліджень охоплює 57 країн світу, а до створення публікацій долучилися 160 організацій, серед яких як академічні установи, так і провідні IT-компанії.

Аналіз ключових слів, візуалізований за допомогою хмари слів (WordItOut) і діаграм (MS Excel), дозволив виокремити найчастіше вживані терміни, зокрема: “music”, “computer games”, “virtual reality”,

“human-computer interaction”. Менш видимі терміни (наприклад, “robotics”, “biofeedback”, “interactive composition”) свідчать про недостатню наукову розробку окремих напрямів. Бібліометричне картування (VOSviewer) дозволило виокремити чотири ключові кластери тем: 1 – технології дизайну музичних ігор; 2 – освітні платформи та мультимедійне середовище; 3 – соціально-психологічний вплив музично-ігрових систем; 4 – соціально-економічні аспекти застосування музики в ігрових платформах.

Результати дослідження можуть стати основою для подальших наукових розвідок у напрямках інтеграції музично-ігрових систем з робототехнікою, а також розширення їх використання у навчальних, реабілітаційних та інноваційних цифрових середовищах.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Zhang, Y., & Chen, L. Artificial Intelligence in Music Composition: A Review. *Journal of Creative Techn.*, 2023, 12(2), 45-60.
- Smith, J., & Lee, K. Adaptive Music in Video Games: Techniques and Applications. *Int. J. of Game Audio*, 2024, 8(1), 22-38.
- Nguyen, T., & Park, S. Cloud Computing for Interactive Music Applications: Challenges and Solutions. *Journal of Cloud Technologies*, 2022, 5(4), 110-125.
- Johnson, M., & Davis, R. Distributed Systems for Real-time Music Collaboration. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2023, 25(6), 1400-1412.
- Brown, A., & Wilson, P. Virtual and Augmented Reality in Music Education. *Educational Technology Review*, 2023, 30(3), 78-95.
- Fesenko T., Ruban I., Karpenko K., Fesenko G., Kovalenko A., Yakunin A., Fesenko H. Improving of the Decision-Making Model in the Processes of External Quality Assurance of Higher Education. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, 1(3(115)), 74–85. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253351>
- Fesenko, T., Golovko, G., Fesenko, H., Yakunin, A., Fesenko, G. Identifying creative tasks in project management with a gender perspective. *CEUR Workshop Proceedings. 4rd International Workshop IT Project Management (ITPM 2023)*, Warsaw, Poland, May 19, 2023, №3453, pp. 186–195. <https://ceur-ws.org/Vol-3453/paper17.pdf>.
- Ткачов В.М., Чепурна І.С., Фесенко Т.Г. Метод мультирівневого VPN-тунелювання для забезпечення віддаленого доступу до вузлів Екстранет-мережі. *Вісник ХНТУ*, 2024, № 3(90), с. 299–308. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.37>.
- Ткачов В.М., Коваленко А.А., Фесенко Т.Г. Оптимізація мережного алгоритму функціонування комп'ютерних мереж підвищеної живучості. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2021, 3(65), с. 143–147. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.3.143>.
- Андрусенко Ю.О., Фесенко Т.Г. Грід-технології в розподілених обчислювальних середовищах. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2023, 3(73), с. 148-151. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.148>.
- Андрусенко Ю.О., Фесенко Т.Г. Нестационарність ресурсів та послуг хмарної інфраструктури. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2023, 4(74), с. 129-133. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.4.129>.
- Rezanov B., Semenova A., Petrovska I., Fesenko T. Model for providing the second factor of authentication into authentication services with centralized account databases. *Proceedings of Fifth International Scientific and Technical Conference on “Computer and information systems and technologies”*, Kharkiv, April 2021, P. 46–47. DOI: <https://doi.org/10.30837/csitic52021232201>.
- Фесенко Т.Г. Управління проектами: теорія та практика виконання проектних дій. Харків: ХНАМГ, 2012. 181 с.
- Barska I., Teslenko P., Fesenko T., Voznyi O. Algorithm of distributing the team load for IT-project. *2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Warsaw, Poland, 2015, pp. 559–562, doi: 10.1109/IDAACS.2015.7341367.
- Lee, H., & Kim, J. Gamification Strategies for Music Learning: A Systematic Review. *Journal of Educational Games*, 2024, 15(1), 10-29.
- Chen, X., & Zhao, Y. Bibliometric Analysis of Digital Music Technologies. *Scientometrics*, 2023, 128(7), 3451-3472.
- Rudenko, S., Haahr, M. (2025). The Gallery Game: Locative Augmented Reality for Cultural Engagement Using Multisensory Design. In: Murray, J.T., Reyes, M.C. (eds) *Interactive Storytelling. ICIDS 2024. Lecture Notes in Computer Science*, vol 15467. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-78453-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-78453-8_6)
- Diehl, C., Silva, T., Ferraz, J., Almeida, A., Martins, A. I., Ribeiro, Ó., Sa8ntinha, G., Rocha, N. and Silva, A. (2025). DanceMove: Promoting Social Interaction and Healthy Ageing Through Foot-Interaction. In *Proceedings of the 11th International Conference on Information and Communication Technologies for Ageing Well and e-Health - IS4WB\_SC*, pages 421-432. DOI: 10.5220/0013504100003938.
- Ahmadian, S., Brevik, L. M. This Land is My Land: Teachers' integration of game and novel in English instruction. (2024) *Journal of Computer Assisted Learning*, 40 (5), pp. 2190-2207. DOI: 10.1111/jcal.13012.
- Connolly T. M., Stansfield M., Hailey T. An alternate reality game for language learning: ARGuing for multilingual motivation. (2011) *Computers and Education*, 57 (1), 2011. pp. 1389-1415. DOI: 10.1016/j.compedu.2011.01.009.
- Guillaume D., Pierre J. Motivation-driven educational game design: applying best practices to music education. *ACE '05: Proceedings of the 2005 ACM SIGCHI International Conference on Advances in computer entertainment technology*. Pages 462 - 465. <https://doi.org/10.1145/1178477.1178581>.

22. A. Monroy-Hernández, M. Resnick. Empowering kids to create and share programmable media. *Interactions*, Volume 15, Issue 2, 2008. Pages 50 - 53. <https://doi.org/10.1145/1340961.1340974>.
23. C. Carvilhe, G. H. M. Moro, A. Vermonde, J. G. Noronha Filho and C. N. Silla, "Interdisciplinary Project-Based Learning: An Experience with Digital Games and Music Production Students," *2024 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, Washington, DC, USA, 2024, pp. 1-9, doi: 10.1109/FIE61694.2024.10893337.
24. Nordin, J. (2024). Dreaming of new musical interaction – the interactive music in the project Dream. *International Journal of Performance Arts and Digital Media*, 20(1), 5–28. <https://doi.org/10.1080/14794713.2024.2328007>
25. A. Syukur, P. N. Andono and A. Maulana Syarif, "A Multiplayer Virtual Reality Game for Playing Gamelan Music in a Virtual Orchestra Mode," *2023 3rd International Conference on Intelligent Cybernetics Technology & Applications (ICICyTA)*, Denpasar, Bali, Indonesia, 2023, pp. 375-379, doi: 10.1109/ICICyTA60173.2023.10428795.
26. Caruso, F., Di Mascio, T. and Pennese, M. (2019). Gamify the Audiation: The CrazySquare Project. In *Proceedings of the 11th International Conference on Computer Supported Education - Volume 1: CSEDU*; ISBN 978-989-758-367-4; ISSN 2184-5026, SciTePress, pages 92-99. DOI: 10.5220/0007764900920099.
27. C. -K. Chang, Y. -T. Tsai and Y. -L. Chin, "A Visualization Tool to Support Analyzing and Evaluating Scratch Projects," *2017 6th IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI)*, Hamamatsu, Japan, 2017, pp. 498-502, doi: 10.1109/IIAI-AAI.2017.83.
28. Tally A. C., Kim Y. R., Boustani K. and Nippert-Eng C. Protect and Project: Names, Privacy, and the Boundary Negotiations of Online Video Game Players. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, Volume 5, Issue CSCW1. Article No.: 159, Pages 1 - 19. <https://doi.org/10.1145/3449233>.
29. Stadelmann, T. *et al.* (2018). Deep Learning in the Wild. In: Pancioni, L., Schwenker, F., Trentin, E. (eds) *Artificial Neural Networks in Pattern Recognition. ANNPR 2018. Lecture Notes in Computer Science()*, vol 11081. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99978-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99978-4_2).
30. Rodet X., Lambert J.-P., Cahen R., Gaudy T., Gosselin F., Mobuchon P. Study of haptic and visual interaction for sound and music control in the phase project. (2005). *Proc. of the Int. Conf. on New Interfaces for Musical Expression*, pp. 109-114.
31. Bridgett, R. (2021). *Leading with Sound: Proactive Sound Practices in Video Game Development (1st ed.)*. Focal Press. <https://doi.org/10.4324/9781003082521>.
32. Frachi, Y., Takahashi, T., Wang, F., Barthet, M. (2022). Design of Emotion-Driven Game Interaction Using Biosignals. In: Fang, X. (eds) *HCI in Games. HCII 2022. Lecture Notes in Computer Science*, vol 13334. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-05637-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-05637-6_10).
33. Maclean A., Ogborn D. Immersive dreams: A shared vr experience. (2020) *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, pp. 380-381.
34. R. Vargas, S. Fallas and V. Solis, "Inclusive Games: 3 in Braille," *2023 IEEE Central America and Panama Student Conference (CONESCAPAN)*, Guatemala, Guatemala, 2023, pp. 191-197, doi: 10.1109/CONESCAPAN60431.2023.10328421.
35. Crespo-Martinez E, Bueno S, Gallego MD. A Video Game for Entrepreneurship Learning in Ecuador: Development Study. *JMIR Formative Research*, 2023; vol. 7: e49263. doi: 10.2196/49263.
36. A. Sorrentino, L. Fiorini, C. L. Viola and F. Cavallo, "Design and development of a social assistive robot for music and game activities: a case study in a residential facility for disabled people," *2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*, Glasgow, Scotland, United Kingdom, 2022, pp. 2860-2863, doi: 10.1109/EMBC48229.2022.9871513.
37. Wiederhold, B.K., Wiederhold, M.D. Evaluation of virtual reality therapy in augmenting the physical and cognitive rehabilitation of war veterans. (2006) *International Journal on Disability and Human Development*, 5 (3), pp. 211-216. DOI: 10.1515/IJDHD.2006.5.3.211.
38. Tsaramiris G, Papoutsidakis M, Derbali M, Khan FQ, Michailidis F. Towards Smart Gaming Olfactory Displays. *Sensors*. 2020; 20(4):1002. <https://doi.org/10.3390/s20041002>.
39. G. R. Marcos, "An investigation on the automatic generation of music and its application into video games," *2019 8th International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction Workshops and Demos (ACIIW)*, Cambridge, UK, 2019, pp. 21-25, doi: 10.1109/ACIIW.2019.8925275.
40. McAuliffe K., Tovar-Henao F., Helmuth M., Mu Y., Jacobson C., Ma H. Cincinnati Center for Computer Music 2024. (2024) *International Computer Music Conference Icmc Proceedings, 2024-July*, pp. 174-177.
41. Marvin C. All under heaven - Megaspaces in Beijing. (2008) *Owning the Olympics Narratives of the New China*, pp. 229-259.
42. Chew E., François A., Liu J., Yang A. Esp: A driving interface for expression synthesis. (2005) *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, pp. 224-227.
43. Blaine T., Forlines C. Jam-o-world: Evolution of the jam-o-drum multi-player musical controller into the jam-o-whirl gaming interface. (2002) *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, pp. NIME02-NIME02-06.
44. Parejo, J.L., de la Cortón-Heras, M.O., Giraldez-Hayes, A. (2021). La dinamización musical del patio escolar: resultados de un proyecto de aprendizaje-servicio. *Revista Electrónica Complutense de Investigación en Educación Musical - RECIEM*, 18, 167-194. <https://doi.org/10.5209/reciem.69734>.
45. Beck S.D., Patrick J., Willkie B., Malveaux K. The immersive computer-controlled audio sound theater: Experiments in multi-mode sound diffusion systems for electroacoustic music performance. (2006) *International Computer Music Conference Icmc 2006*, pp. 649-655.
46. Green M.S. Self-Expression. (2008) *Self Expression*, 240 p. doi: 10.1093/acprof:oso/9780199283781.001.0001
47. Masquelier A. Teatime: Boredom and the temporalities of young men in Niger. (2013) *Africa*, 83 (3), pp. 470-491. DOI: 10.1017/S0001972013000272.
48. Friberg J., Gärdenfors D. Audio games: New perspectives on game audio. (2004) *ACM International Conference Proceeding Series*, 74, pp. 148-154.
49. C. M. Kanode and H. M. Haddad, "Software Engineering Challenges in Game Development," *2009 Sixth International Conference on Information Technology: New Generations*, Las Vegas, NV, USA, 2009, pp. 260-265, doi: 10.1109/ITNG.2009.74.

50. Gélinas-Phaneuf, N., Choudhury, N., Al-Habib, A.R. et al. Assessing performance in brain tumor resection using a novel virtual reality simulator. *Int J CARS* 9, 1–9 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11548-013-0905-8>.
51. Swinnen, N., Vandenbulcke, M., de Bruin, E.D. et al. The efficacy of exergaming in people with major neurocognitive disorder residing in long-term care facilities: a pilot randomized controlled trial. *Alz Res Therapy* 13, 70 (2021). <https://doi.org/10.1186/s13195-021-00806-7>.
52. Adams J. C., Webster A.R. What do students learn about programming from game, music video, and storytelling projects? (2012) SIGCSE 12 Proceedings of the 43rd ACM Technical Symposium on Computer Science Education, pp. 643-648.
53. Kahn K., Winters N. Constructionism and AI: A history and possible futures. (2021) *British Journal of Educational Technology*, 52 (3), pp. 1130-1142.
54. Fulkerson J.A., Loth K., Bruening M., Berge J., Eisenberg M.E., Neumark-Sztainer D. Time 2 tlk 2nite: Use of electronic media by adolescents during family meals and associations with demographic characteristics, family characteristics, and foods served. (2014) *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 114 (7), pp. 1053-1058.
55. Gorely, T., Biddle, S. J. H., Marshall, S. J., & Cameron, N. (2009). The prevalence of leisure time sedentary behaviour and physical activity in adolescent boys: An ecological momentary assessment approach. *International Journal of Pediatric Obesity*, 4(4), 289–298. <https://doi.org/10.3109/17477160902811181>.
56. Barrett E., Burke M., Whelan S., Santorelli A., Oliveira B.L., Cavallo F., Dröes R.-M., Hopper L., Fawcett-Henesy A., Meiland F.J.M., Mountain G., Moyle W. Evaluation of a companion robot for individuals with dementia: Quantitative findings of the MARIO project in an Irish residential care setting. (2019) *Journal of Gerontological Nursing*, 47 (7), pp. 36-45. DOI: 10.3928/00989134-20190531-01.

Received (Надійшла) 17.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.08.2025

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Фесенко Тетяна Григорівна** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Tetiana Fesenko** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [tetiana.fesenko@nure.ua](mailto:tetiana.fesenko@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0001-9636-9598>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57163379800>.

**Сергєєв Данило Володимирович** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Danylo Serheiev** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine;

e-mail: [danylo.serheiev@nure.ua](mailto:danylo.serheiev@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0008-7897-7600>.

**Долгополов Олексій Максимович** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Oleksii Dolhopolov** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [oleksii.dolhopolov@nure.ua](mailto:oleksii.dolhopolov@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0004-7911-7291>.

**Сергородцев Ілля Дмитрович** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Illia Serhorodtsev** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [illia.serhorodtsev@nure.ua](mailto:illia.serhorodtsev@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0002-3146-1195>.

**Жук Максим Володимирович** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Maksym Zhuk** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine;

e-mail: [maksym.zhuk@nure.ua](mailto:maksym.zhuk@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0009-2720-5771>.

#### Information technologies for creating music and game projects: bibliometric analysis

Tetiana Fesenko, Danylo Serheiev, Oleksii Dolhopolov, Illia Serhorodtsev, Maksym Zhuk

**Abstract. Relevance.** The development of information technology (IT) is contributing to the emergence of new forms of creative interaction, in particular in the field of music and gaming projects that combine music, game mechanics, and digital technologies. The integration of IT into such products creates innovative opportunities for learning, rehabilitation, and entertainment, which makes it necessary to systematize knowledge in this area. **Object of research:** scientific publications on the use of information technology for the implementation of music and gaming projects. **Purpose of the article.** to identify publications that form knowledge about modern IT for creating music and game projects. **Research results.** The article conducts a bibliometric analysis of 414 documents from the Scopus database using the query “music AND game AND projects” (1995-2025). The article identifies 24 subject areas grouped into six branches of knowledge. It was found that the majority of publications belong to computer science. The keywords are analyzed and structured into four semantic clusters: music game development technologies, educational multimedia platforms, psychological and therapeutic aspects, and socio-economic effects. The insufficient representation of areas related to robotics, multisensory systems, and music therapy in the game environment has been revealed. **Conclusions.** The obtained results allow us to expand our understanding of the scientific structure of the topic of music and game projects and identify areas for further research, in particular in the educational and rehabilitation field and in the development of interactive IT products. Scope of application of the results: educational, cultural, rehabilitation and creative digital platforms based on music and game interactions.

**Keywords:** music and game projects; information technology (IT); bibliometric analysis; bibliometric data; bibliometric map; keyword clustering.

Г. В. Худов<sup>1</sup>, І. А. Хижняк<sup>1</sup>, О. В. Сальник<sup>1</sup>, П. Є. Минко<sup>2</sup>, В. В. Андронов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

<sup>3</sup> Науково-дослідний інститут Воєнної розвідки, Київ, Україна

## АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ТА АРХІТЕКТУРНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ З БОРТОВИХ СИСТЕМ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

**Анотація.** Предметом вивчення в статті є підходи до моделювання та архітектурного представлення інформаційної технології. **Метою** є аналіз підходів до моделювання та архітектурного представлення інформаційної технології обробки зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження. **Завдання:** здійснити аналіз існуючих підходів до моделювання та архітектурного представлення інформаційних технологій з урахуванням особливостей обробки зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження; виокремити найбільш релевантні для розробки інформаційних технологій обробки зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження; сформувати рекомендації щодо застосування уніфікованих моделей для забезпечення зручності взаємодії різних фахівців у межах одного технічного середовища. Використовуваними **методами** є: аналітичні та емпіричні методи порівняльного дослідження, методи створення інформаційних технологій. Отримані такі **результати**. Проаналізовано та систематизовано основні підходи до моделювання інформаційних технологій, зокрема функціональне, об'єктно-орієнтоване, поведінкове та бізнес-моделювання. Визначено, що ефективне проєктування систем обробки зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження потребує комплексного використання цих підходів залежно від специфіки задач. Окремо розглянуто архітектурні концепції (монолітна, мікросервісна, C4-модель, TOGAF, трирівнева структура), що дають змогу формалізувати логіку функціонування складних IT-рішень. Також охарактеризовано сучасні інструменти для побудови діаграм і моделей, що підтримують процес проєктування, верифікації та документування систем. **Висновки.** Моделювання є критично важливою складовою при створенні інформаційних технологій для обробки зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження. Ефективність таких IT-рішень забезпечується комплексним застосуванням різних підходів до моделювання та архітектурного проєктування. Поєднання функціональних, об'єктно-орієнтованих, поведінкових та бізнес-моделей, а також використання сучасних архітектурних рішень і інструментів, сприяє створенню надійних, масштабованих і адаптивних систем. Отримані результати можуть бути використані як методологічна основа при розробці інформаційних технологій у сфері бортового спостереження та подібних складних технічних систем.

**Ключові слова:** інформаційна технологія, моделювання інформаційної технології, архітектурне представлення інформаційної технології, обробка зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження.

### Вступ

#### Постановка проблеми у загальному вигляді.

У сучасних умовах інтенсивного розвитку систем дистанційного зондування Землі, безпілотних авіаційних комплексів та супутникових платформ особливої актуальності набувають інформаційні технології, здатні ефективно обробляти візуальну інформацію, отриману з бортових оптико-електронних засобів спостереження [1–3]. Надійна, оперативна та якісна обробка таких зображень це ключова умова для виконання завдань моніторингу, навігації, розвідки та ситуаційної обізнаності в режимі реального часу [4].

Проте ефективність функціонування зазначених технологій значною мірою залежить від правильного моделювання їх структури та побудови архітектури інформаційної системи. Адже моделювання та архітектурне представлення є ключовими етапами у створенні сучасної інформаційної технології, особливо в такій складній сфері, як обробка зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження. В умовах зростаючих вимог до точності, швидкодії та надійності IT-рішень, грамотне структурування та формалізація компонентів системи забезпечують основу для подальшого розвитку, масштабування та інтеграції таких рішень у складні технічні комплекси.

Також особливістю області обробки зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження є необхідність інтеграції таких рішень у складні бортові комплекси з обмеженими ресурсами та високими вимогами до швидкодії, точності та автономності.

Крім того, сучасні системи створюються міждисциплінарними командами фахівців: програмістами, архітекторами систем, аналітиками, операторами, інженерами технічного супроводу. Кожен із них працює зі своїм баченням структури та функцій системи, має свої специфічні запити та вимоги. В такому середовищі уніфікація моделей і архітектурного представлення інформаційних технологій дозволяє забезпечити спільну мову, що полегшує комунікацію, інтеграцію та подальший розвиток інформаційної технології обробки зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження.

Основними вимогами замовників до сучасних інформаційних систем обробки зображень з бортових оптико-електронних систем є: здатність забезпечити високу точність обробки, адаптація до змін середовища, масштабованість і інтеграція з іншими компонентами розвідувально-аналітичних комплексів [3, 4]. Водночас розробники стикаються з низкою викликів, пов'язаних з великим обсягом оброблюваних даних, потребою в реальному часі опрацювання зображень, обмеженими обчислювальними ресурсами бортової

платформи, а також високими вимогами до надійності та автономності систем [5, 6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасний стан розвитку інформаційних технологій засвідчує існування великої кількості підходів до їхнього моделювання та архітектурного представлення. Ці підходи активно застосовуються в різноманітних галузях – від бізнес-аналізу до промислової автоматизації, від медичних інформаційних систем до систем керування технічними об'єктами [7]–[8]. Як правило, вибір того чи іншого методу моделювання залежить від специфіки предметної області, цілей проекту, рівня складності об'єкта моделювання та потреб користувачів.

На сьогоднішній день в науковій і прикладній літературі здебільшого представлено підходи, які були розроблені в контексті таких галузей, як бізнес-процеси (BPMN, UML) [9]–[10], промислова автоматизація (SCADA-системи) [11], проектування IT-інфраструктур, моделювання кіберфізичних систем та інші. Серед найпоширеніших підходів можна відмітити: об'єктно-орієнтоване моделювання (UML, SysML) [10], функціонально-структурне представлення (IDEF0, DFD) [12], процесно-орієнтовані моделі, сервісно-орієнтована архітектура (SOA) [13].

У літературі також приділяється увага моделюванню інформаційних технологій у галузях із підвищеними вимогами до надійності, таких як авіація, оборонна промисловість, телеметрія. Однак саме область обробки зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження характеризується підвищеною складністю та недостатньою кількістю стандартизованих моделей. Дана область є високо спеціалізованою: вона характеризується обмеженими ресурсами бортових платформ, вимогами до обробки даних у реальному часі, потребою в автономності рішень, а також критичною важливістю точності, ретельності й надійності аналізу візуальної інформації. У зв'язку з цим постає проблема вибору такого підходу до моделювання та архітектурного подання інформаційної технології, який би не лише відповідав загальним принципам системної інженерії, але й був адаптований до специфіки застосування в умовах аерокосмічних і військово-технічних платформ.

Дослідження, що розглядають системи автоматичного аналізу зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження, здебільшого фокусуються на алгоритмах комп'ютерного зору (нейронні мережі, кластеризація, методи глибокого навчання) [14]–[16], проте питання структурного й архітектурного подання цих систем лишається менш висвітленим в науковій і прикладній літературі. Особливо актуальною є потреба в адаптації існуючих методів моделювання до умов роботи в реальному часі, з урахуванням обмежень бортових платформ.

Зважаючи на те, що універсального підходу не існує, постає завдання визначення критеріїв, за якими можна розробникам обґрунтовано здійснювати

вибір методів моделювання та архітектурних рішень: рівень абстракції, ступінь формалізації, підтримка життєвого циклу IT-рішення, підтримка модульності (масштабованість), підтримка міждисциплінарної взаємодії (розробників, операторів, аналітиків), інтеграція з апаратною частиною систем тощо.

Таким чином, проблема полягає не лише у створенні ефективної інформаційної технології обробки зображень, а й у визначенні та адаптації наявних підходів до її уніфікованого й стандартизованого моделювання, яке було б зрозумілим, доступним і прийнятним для широкого кола фахівців – від розробників програмного забезпечення до інженерів-експлуатантів та аналітиків. Це передбачає також узгодження архітектурних рішень із вимогами міждисциплінарної співпраці, підтримки життєвого циклу системи та можливостей її масштабування в майбутньому.

З огляду на це, в даній статті проведено аналіз існуючих підходів до моделювання та архітектурного представлення інформаційних технологій, з метою:

– здійснити їх аналіз з урахуванням особливостей обробки зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження;

– виокремити найбільш релевантні для розробки інформаційних технологій обробки зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження;

– сформулювати рекомендації щодо застосування уніфікованих моделей для забезпечення зручної взаємодії різних фахівців у межах одного технічного середовища.

**Мета статті** – аналіз підходів до моделювання та архітектурного представлення інформаційної технології обробки зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження.

## Основна частина

### 1. Моделювання інформаційної технології.

Моделювання інформаційної технології – це процес формалізованого опису її структури, функцій, взаємодій та поведінки за допомогою різноманітних абстрактних представлень. Основною метою моделювання є створення цілісного уявлення про систему ще до її фізичної реалізації, що дозволяє здійснити її аналіз, перевірку, оптимізацію, тестування, уніфікацію та документування на всіх етапах життєвого циклу. Особливо актуальним є моделювання в контексті побудови складних інформаційних технологій, таких як системи обробки зображень з бортових оптико-електронних платформ, де необхідно враховувати складну структуру вхідних даних, обчислювальні обмеження, режими роботи в реальному часі та специфіку інтеграції з іншими бортовими або наземними підсистемами.

У сучасній практиці існує кілька базових підходів до моделювання, кожен з яких застосовується відповідно до поставлених цілей, типу системи та вимог до представлення даних. Розглянемо ці підходи до моделювання.

### **1.1. Функціональне моделювання**

Цей підхід ґрунтується на розкладанні системи на окремі функції, між якими передаються дані у вигляді потоків. Він дозволяє наочно представити що саме виконує система і як здійснюється обробка даних між її частинами.

Найпоширенішими прикладами інструментів функціонального моделювання є [12], [17, 18]:

- IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling) – один із найбільш усталених методів функціонального моделювання, що дає змогу представити систему у вигляді ієрархії функціональних блоків з входами, виходами, механізмами та обмеженнями;

- DFD (Data Flow Diagrams) – діаграми потоків даних, які фокусуються на потоках інформації між процесами, базами даних і зовнішніми суб'єктами.

Функціональне моделювання є особливо корисним для аналізу та проектування логіки обробки зображень, включаючи етапи прийому сигналу, попередньої обробки, обробки, класифікації, інтерпретації тощо.

### **1.2. Об'єктно-орієнтоване моделювання**

Цей підхід базується на принципах інкапсуляції, успадкування та поліморфізму, що дозволяє створювати моделі, близькі до структури сучасних мов програмування. У центрі моделі – об'єкти (сутності), які мають властивості (дані) та методи (поведінку). Основним інструментом об'єктно-орієнтованого моделювання є UML (Unified Modeling Language) – універсальна мова візуального моделювання, яка включає кілька типів діаграм [10]:

- діаграми класів, об'єктів, компонентів, пакетів (структурний рівень),

- діаграми варіантів використання, послідовностей, діяльності, станів (поведінковий рівень).

Об'єктно-орієнтоване моделювання особливо ефективно при архітектурному проектуванні програмного забезпечення для модульних або мікросервісних систем, у яких кожен компонент має власні інтерфейси, методи та взаємозв'язки.

Окрім UML, для моделювання складних технічних систем часто використовується SysML (Systems Modeling Language) – спеціалізоване розширення UML, призначене для міждисциплінарного системного інжинірингу. SysML підтримує моделювання не лише програмних компонентів, але й апаратного забезпечення, фізичних процесів, вимог, параметрів продуктивності, обмежень тощо.

SysML включає типи діаграм, аналогічні UML (структурні, поведінкові), але також має власні спеціалізовані діаграми [19]:

- діаграми вимог – для представлення функціональних та нефункціональних вимог до системи;

- параметричні діаграми – для опису обмежень і залежностей між параметрами системи;

- блок-схеми (Block Definition Diagrams) – для моделювання фізичних і логічних частин системи;

- діаграми розгортання – для моделювання фізичного розміщення компонентів.

Використання SysML дозволяє об'єднати програмну архітектуру з інженерними аспектами, що

особливо важливо для проектування інформаційних технологій в авіаційних, космічних та вбудованих системах, зокрема при створенні систем обробки зображень з бортових сенсорів.

### **1.3. Моделювання поведінки системи**

Цей підхід орієнтований на відображення динамічних аспектів функціонування системи, таких як зміна її станів у часі, реакція на події, черговість виконання процесів.

Інструментами є [20]:

- діаграми станів (State Diagrams) – відображають переходи між станами об'єкта в результаті певних подій;

- діаграми активності (Activity Diagrams) – ілюструють алгоритми виконання процесів, черговість дій, можливі паралельні потоки.

У системах обробки зображень моделювання поведінки дає змогу відобразити режими роботи системи: наприклад, ініціалізація камери, зчитування кадру, обробка, виявлення об'єктів, збереження або передача даних, реакція на зміну умов освітлення тощо.

### **1.4. Бізнес-моделювання**

Бізнес-моделювання використовується для опису бізнес-процесів або операційних сценаріїв, які реалізуються або обслуговуються інформаційною технологією. Такий підхід дозволяє побудувати зв'язок між технічною реалізацією та практичними потребами користувача чи організації.

Основним стандартом є BPMN (Business Process Model and Notation) – графічна нотация для опису бізнес-процесів, яка підтримується багатьма сучасними інструментами [9].

У контексті систем оптико-електронного спостереження BPMN може бути використана для моделювання взаємодії між модулями обробки зображень, операторами, аналітичними службами та зовнішніми інформаційними системами.

Отже, функціональні методиками, такі як IDEF0 і DFD, забезпечують чітку структуру, що критично для пояснення потоків обробки. UML та об'єктно-орієнтовані моделі підходять для програмних архітектур і інтегруються з мікросервісами. Моделювання поведінки через UML підтверджується практикою архітекторів програмного забезпечення, а BPMN – як стандартний інструмент бізнес-моделювання. Таке поєднання підходів лежить в основі ефективного створення інформаційних технологій обробки зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження. Комплексне моделювання інформаційної технології потребує поєднання кількох підходів. Наприклад, функціональне моделювання може використовуватися для представлення загальної логіки роботи, об'єктно-орієнтоване – для реалізації архітектури програмного забезпечення, а поведінкове – для симуляції динаміки функціонування системи в різних умовах. Вибір підходу має здійснюватися з урахуванням характеру задачі, типу системи, наявних ресурсів і кінцевих користувачів моделі.

## **2. Архітектурне представлення інформаційної технології**

Архітектура ІТ-системи – це структурне уявлення про її основні компоненти, способи їхньої

взаємодії, розподіл функцій, технологічні залежності та принципи організації. Архітектурне представлення слугує своєрідною "картою" системи, яка дозволяє забезпечити розуміння, масштабованість, підтримуваність і надійність при проектуванні складних технологічних рішень.

У випадку розробки інформаційних технологій обробки зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження архітектура визначає, як саме реалізуються етапи збору, обробки, зберігання та передачі зображень, а також як система взаємодіє з іншими платформами чи аналітичними службами.

Серед найпоширеніших підходів до архітектурного представлення виділяють наступні, які розглянемо далі.

### 2.1. Архітектурні моделі з використанням шаблонів

Ці моделі спираються на типові шаблони архітектур, які довели свою ефективність у різних сферах інформаційних технологій. До них належать [21]:

- монолітна архітектура – система реалізована як єдине ціле, де всі компоненти взаємозалежні та функціонують в одному середовищі. Такий підхід простий у реалізації, але має обмежену гнучкість і масштабованість, що ускладнює супровід великих або розподілених систем;

- клієнт-серверна архітектура – класичний підхід, за якого функціональність розподіляється між клієнтом (інтерфейс користувача) та сервером (обробка запитів, доступ до баз даних, зберігання логіки). Актуальний у багатьох прикладних системах, включаючи віддалену обробку зображень;

- мікросервісна архітектура (MSA) – передбачає поділ системи на набір незалежних сервісів, кожен із яких відповідає за окрему функціональність. Сервіси взаємодіють між собою через API (Application Programming Interface) або повідомлення. Цей підхід забезпечує масштабованість, незалежне розгортання модулів та гнучкість оновлень;

- сервіс-орієнтована архітектура (SOA) – базується на обміні даними через веб-сервіси (SOAP, REST) та орієнтована на інтеграцію різнорідних систем. Забезпечує модульність і повторне використання функцій у корпоративному середовищі.

### 2.2. C4-модель архітектури

C4-модель (Context, Containers, Components, Code) – це сучасний, візуально орієнтований підхід до опису архітектури програмних систем, що охоплює кілька рівнів абстракції [22]:

- рівень 1 – контекст: загальна картина взаємодії системи із зовнішнім середовищем (користувачами, іншими системами);

- рівень 2 – контейнери: логічне розділення системи на окремі програми, сервіси чи бази даних;

- рівень 3 – компоненти: деталізація функціональних частин усередині контейнерів;

- рівень 4 – код: реалізація конкретної логіки на рівні вихідного коду.

C4-модель сприяє узгодженому розумінню архітектури як серед розробників, так і бізнес-

аналітиків, оскільки забезпечує чітке візуальне представлення.

### 2.3. Архітектура за TOGAF

TOGAF (The Open Group Architecture Framework) – це всесвітньо визнаний фреймворк для побудови корпоративних IT-архітектур, який застосовується в складних організаційних і технологічних середовищах.

Архітектура в TOGAF розділяється на чотири домени [23]:

- бізнес-архітектура – описує стратегію, організаційну структуру та бізнес-процеси;

- архітектура даних – визначає структуру, потоки та сховища інформації;

- архітектура додатків – описує взаємодію прикладних компонентів;

- технологічна архітектура – включає інфраструктуру, апаратне забезпечення, мережеві та платформні ресурси.

TOGAF застосовується переважно в проєктах, де IT-технології тісно інтегруються з організаційними завданнями.

### 2.4. Трирівнева (трійшарова) архітектура

Цей підхід передбачає логічне поділення системи на три взаємозалежні рівні, кожен із яких виконує власну функцію [24]:

- Presentation Layer (UI) – рівень інтерфейсу користувача, через який здійснюється взаємодія із системою;

- Logic Layer (Business Logic) – обробка бізнес-логіки, реалізація основних алгоритмів обробки даних;

- Data Layer (Data Access) – доступ до баз даних, збереження та отримання інформації.

Така архітектура забезпечує модульність, повторне використання компонентів та спрощення тестування, що є важливим при створенні програмного забезпечення для обробки зображень у режимі реального часу або з великими обсягами даних.

Отже, архітектурне представлення інформаційної технології є основою для її ефективного проєктування, впровадження й масштабування. Вибір архітектурного підходу залежить від характеру задачі, технічних вимог, обсягів даних, потреб у розширюваності та інтеграції з іншими системами. Аналіз існуючих архітектур дає змогу обґрунтовано обрати модель, яка найкраще відповідає вимогам конкретної IT-системи, зокрема – у галузі бортових технологій оптико-електронного спостереження.

## 3. Інструменти для моделювання й архітектурного опису

Розробка сучасних IT-систем вимагає використання інструментів, що підтримують моделювання, архітектурне проєктування, візуалізацію процесів та ведення документації. Вибір інструментів залежить від обраної методології, складності системи, рівня деталізації та колабораційних потреб команди. У цьому розділі наведено ключові категорії таких засобів та приклади їх застосування.

### 3.1. Інструменти для побудови UML/DFD/BPMN-діаграм

Ці інструменти дозволяють створювати стандартизовані нотації, які широко використовуються

для моделювання структурних і поведінкових аспектів систем [25]:

– Lucidchart – веб-застосунок для побудови діаграм будь-якої складності: від DFD та BPMN до UML. Має інтеграцію з Google Workspace, Slack та Confluence. Підходить для командної роботи в реальному часі;

– Draw.io (diagrams.net) – безкоштовний онлайн-інструмент з широким набором шаблонів UML, BPMN, ER-діаграм тощо. Має простий інтерфейс і підтримує збереження проєктів у хмарі (Google Drive, OneDrive);

– StarUML – потужне десктопне середовище для створення діаграм UML 2.x і SysML. Підтримує кодування моделей, розширення плагінами та експорт у різні формати.

### **3.2. Інструменти для побудови IDEF0-діаграм**

Для створення IDEF0-діаграм використовується низка спеціалізованих інструментів, які відрізняються функціональністю, доступністю та рівнем складності [17]:

– Visual Paradigm – професійне середовище для моделювання з повною підтримкою стандарту IDEF0. Дозволяє створювати ієрархічні функціональні моделі, а також експортувати діаграми у форматі PDF, зображення, HTML;

– Microsoft Visio – популярна платформа для побудови діаграм. Підтримує створення IDEF0-діаграм за допомогою шаблонів (додаються вручну або завантажуються окремо). Підтримується ручне моделювання функціональних блоків;

– Lucidchart – хмарний онлайн-інструмент для створення діаграм, що підтримує шаблони IDEF0 та спільну роботу в реальному часі. Зручний для швидкої побудови моделей без потреби встановлення програмного забезпечення;

– SmartDraw – гібридний онлайн і десктопний редактор, який має готові шаблони для IDEF0 та функцію автоматичного вирівнювання елементів;

– OpenModelSphere – безкоштовне open-source середовище моделювання, яке підтримує IDEF0, DFD та ERD. Підходить для некомерційного або навчального використання;

– Enterprise Architect (Sparx Systems) – потужне професійне середовище, орієнтоване на архітектурне моделювання систем. Підтримує IDEF0 через шаблони та профілі, а також UML, SysML, BPMN, TOGAF;

– BPWin – спеціалізований інструмент для побудови IDEF0-діаграм з прямою підтримкою методології та ієрархічним представленням функцій. Хоча вже вважається застарілим, досі використовується в окремих галузях.

Рекомендується обирати Lucidchart або Microsoft Visio для навчання й швидкої візуалізації, Visual Paradigm чи Enterprise Architect – для професійного моделювання та командної роботи, а OpenModelSphere – для безкоштовного або open-source використання.

### **3.3. Засоби для опису архітектури систем (C4, TOGAF тощо)**

Для архітектурного представлення системи на рівні контексту, контейнерів, компонентів і техно-

логій використовують спеціалізовані інструменти [21]–[22]:

– Structurizr – інструмент для побудови архітектури за C4-моделлю. Підтримує автоматичну генерацію діаграм з коду (Java, C#, DSL). Зручний для DevOps-практик;

– Archi – безкоштовне середовище для моделювання корпоративної архітектури за методологією ArchiMate (яка тісно інтегрується з TOGAF). Дає змогу моделювати бізнес-процеси, додатки та IT-інфраструктуру;

– Enterprise Architect – професійний інструмент, що підтримує UML, SysML, BPMN, ArchiMate, а також TOGAF. Має засоби для зворотного та прямого інжинірингу, ведення документації, моделювання даних і створення звітів. Підходить для великих команд і масштабних проєктів.

### **3.4. Інструменти для прототипування UI/UX**

Прототипування інтерфейсів користувача – важливий етап у створенні програмної частини IT-систем. Ці інструменти дозволяють створювати візуальні макети й інтерактивні прототипи [26]:

– Figma – хмарний редактор для дизайну UI/UX, що підтримує спільну роботу в режимі реального часу. Підтримує прототипування, анімацію, компоненти та плагіни. Широко використовується в agile-командах;

– Balsamiq – інструмент для створення швидких, схематичних макетів інтерфейсів (wireframes). Дає змогу швидко передати ідею інтерфейсу, ще до розробки його дизайну.

### **3.5. Платформи для зберігання та спільного ведення документації**

Ведення документації є критично важливим для узгодження командної роботи, фіксації архітектурних рішень та підтримки проєкту у майбутньому [21], [23]:

– Confluence – корпоративна вікі-система від Atlassian. Дозволяє організувати документацію у вигляді сторінок, які можна коментувати, пов'язувати між собою, інтегрувати з Jira;

– Notion – сучасна універсальна платформа для створення документів, баз знань, таблиць, списків завдань тощо. Підтримує гнучку структуру контенту, шаблони, таблиці й інтеграції. Часто використовується стартапами та кросфункціональними командами.

Отже, вибір інструментів моделювання та архітектурного опису залежить від типу проєкту, складності системи, кількості учасників розробки та прийнятих стандартів. Важливо не лише створити модель, але й забезпечити її зрозумілість, підтримку та актуальність упродовж усього життєвого циклу системи. Інтеграція візуальних інструментів, архітектурних фреймворків і документальних платформ сприяє підвищенню якості проєктних рішень та ефективності командної взаємодії.

### **4. Переваги системного моделювання та архітектурного опису**

Системне моделювання та архітектурне представлення інформаційної технології є невід'ємною

складовою сучасного підходу до розробки складних ІТ-рішень. Вони дозволяють не лише візуалізувати систему, а й забезпечити чітке планування, управління ризиками та узгодження рішень між усіма учасниками проекту. Нижче наведено ключові переваги цього підходу:

#### **4.1. Забезпечення цілісного бачення системи**

Моделі та архітектурні діаграми дозволяють охопити всю систему як єдине ціле – від користувачьких інтерфейсів до внутрішньої логіки та баз даних. Це особливо важливо для:

- систем з великою кількістю компонентів та взаємозв'язків;
- міждисциплінарних команд, де важливо узгодити уявлення про функціональність;
- забезпечення відповідності між технічними, бізнесовими та експлуатаційними вимогами.

Цілісна модель дає змогу краще зрозуміти призначення, ролі та відповідальність кожного елемента системи.

#### **4.2. Раннє виявлення помилок та недоліків**

Системне моделювання дає змогу перевірити логіку роботи системи ще до початку кодування, завдяки чому:

- можна виявити конфлікти, неузгодженості, пропущені сценарії чи надмірні залежності;
- знижуються витрати на виправлення помилок у пізніх стадіях розробки;
- зростає якість фінального рішення завдяки глибшому розумінню системи ще на етапі проектування.

Таким чином, модель служить інструментом для аналізу, симуляції та перевірки поведінки системи до її реалізації.

#### **4.3. Полегшення комунікації між учасниками проекту**

Використання візуальних моделей, стандартних нотацій (UML, BPMN, C4 тощо) сприяє ефективному обміну інформацією між усіма учасниками розробки, включно з:

- розробниками програмного забезпечення;
- бізнес-аналітиками;
- замовниками та користувачами;
- архітекторами й системними адміністраторами.

Моделі виконують роль "спільної мови", яка зменшує ймовірність непорозумінь, сприяє узгодженню вимог і прискорює прийняття рішень.

#### **4.4. Основу для масштабування, підтримки та еволюції системи**

Моделювання та архітектурне представлення створюють формалізовану документацію, яка:

- служить довідковим джерелом для нових членів команди;
- дозволяє швидко орієнтуватися у структурі при внесенні змін;
- полегшує масштабування, модернізацію та супровід системи;
- забезпечує відповідність змін існуючим стандартам, вимогам і залежностям.

Це особливо важливо для довгострокових або розподілених проектів, де якісна документація відіграє критичну роль.

Отже, системне моделювання та архітектурний опис є не лише технічним етапом проектування, а стратегічним інструментом для досягнення надійності, прозорості та узгодженості під час створення складних інформаційних технологій. Їх використання суттєво підвищує шанси на успішну реалізацію ІТ-проекту, забезпечуючи контроль, передбачуваність і довгострокову життєздатність системи.

### **Висновки**

У сучасному світі розробки складних інформаційних технологій, зокрема в галузі обробки зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження, моделювання відіграє ключову роль як на етапі проектування, так і в процесі інтеграції, тестування та подальшого супроводу систем. Проведений аналіз свідчить, що ефективне моделювання інформаційної технології неможливе без гнучкого поєднання кількох підходів – функціонального, об'єктно-орієнтованого, поведінкового та бізнес-моделювання. Кожен із цих підходів виконує свою унікальну функцію у відображенні логіки, структури, поведінки чи контексту застосування ІТ-системи.

Функціональні методика (IDEF0, DFD) дозволяють формалізувати потоки даних і послідовності обробки, що є важливим для побудови моделей обробки сигналів та візуалізації технологічних процесів.

Об'єктно-орієнтовані підходи (UML, SysML) забезпечують глибоке структурне та поведінкове представлення програмних і апаратних компонентів системи, сприяючи інтеграції з реальними мовами програмування та середовищами розробки. Поведінкові моделі (діаграми станів, активностей) демонструють динаміку та реакції систем на події, що критично для систем реального часу. Бізнес-моделювання (BPMN) дозволяє поєднати технічну реалізацію з практичними сценаріями використання, враховуючи роль людського фактора, організаційних процедур і зовнішніх інформаційних потоків.

Не менш важливим є архітектурне представлення інформаційної технології, що задає фундаментальні принципи її організації, масштабування, адаптації до змін середовища та інтеграції з іншими підсистемами. У роботі були розглянуті сучасні архітектурні підходи: від класичних (монолітної, клієнт-серверної) до гнучких і масштабованих (мікросервісна архітектура, SOA), а також багаторівневих моделей (трирівнева архітектура, C4, TOGAF). Залежно від специфіки задачі та контексту застосування, кожен з них може забезпечити потрібний рівень модульності, гнучкості та керованості системи.

Крім того, сучасні інструменти моделювання (Lucidchart, Draw.io, Visual Paradigm, Enterprise Architect тощо) надають широкі можливості для побудови, візуалізації, аналізу та супроводу моделей, забезпечуючи командну роботу, документування та підтримку життєвого циклу ІТ-продукту.

Загалом, розробка інформаційних технологій для обробки зображень з бортових систем оптико-

електронного спостереження вимагає системного підходу до моделювання та архітектури. Поєднання різних методологій та інструментів дозволяє врахувати як технічні аспекти системи (обчислювальні обмеження, режими реального часу, інтеграція з сенсорами), так і бізнес-вимоги, експлуатаційні сценарії, можливості масштабування та адаптації. Таким чином, моделювання виступає не лише засобом проєктування, а й критичним інструментом забезпечення якості, надійності та ефективності сучасних інформаційних технологій.

А грамотне моделювання та архітектурне представлення інформаційної технології є не лише інженерним завданням, а й необхідною умовою

досягнення ефективності, масштабованості та адаптивності систем оптико-електронного спостереження у складних умовах сучасного інформаційного простору.

### Подяка

Дослідження були проведені за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках конкурсу “Наука для зміцнення обороноздатності України”, назва проєкту “Інформаційна технологія автоматизованого сегментування зображень об’єктів в системах націлювання ударних FPV-дронів на основі алгоритмів ройового інтелекту”, реєстраційний номер 2023.04/0153.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Довгий С. О., Лялько В. І., Бабійчук С. М., Кучма Т. Л., Томченко О. В., Юрків Л. Я. Основи дистанційного зондування Землі: історія та практичне застосування. Київ: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019. 316 с.
2. Байрак Г., Муха Б. Дистанційні дослідження Землі. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2010. 712 с.
3. Даник Ю. Г., Топольницький П. П., Пулеко І. В., Поздняков П. В., Родіонов А. В., Бугайов М. В. Основи побудови безпілотних роботизованих систем спеціального призначення. Житомир: ЖВІ, 2016. 306 с.
4. Манойлов В. П., Омельчук В. В., Опанюк В. В. Дистанційне зондування Землі із космосу: науково-технічні основи формування й обробки видової інформації. Житомир: ЖДТУ, 2008. 384 с.
5. Білоус В.В., Боднар С.П., Курач Т.М., Молочко А.М., Патиченко Г.О., Підлісецька І.О. Дистанційне зондування з основами фотограмметрії: навчальний посібник К.: ВПЦ «Київський університет», 2011. 367 с.
6. Кохан С. С. Геоінформаційний аналіз і моделювання. Ч. 1. Навч.-мет. пос. Київ: ЦП «КОМПРИНТ», 2018. 93 с.
7. Злепко С. М., Тимчик С. В., Федосова І. В. та ін. Сучасні інформаційні технології в науці та освіті: навчальний посібник [Електронний ресурс]. Вінниця: ВНТУ, 2018. 161 с.
8. Шевчук Т. В., Кравчук Г. Т. Стан і перспективи розвитку інформаційних технологій в Україні. Науковий вісник НЛТУ України. Серія Економічна. 2018, т. 28, No 9. С. 114–118. <https://doi.org/10.15421/40280922>
9. Lee W.-T., Ma S.-P. Process modeling and analysis of service-oriented architecture-based wireless sensor network applications using multiple-domain matrix. International Journal of Distributed Sensor Networks. 2016. <https://doi.org/10.1177/1550147716676556>
10. Friedenthal S., Moore A., Steiner R. Systems engineering with SysML/UML: Modeling, analysis, design. A volume in The MK/OMG Press. Book. 2008.
11. Gezer D., Unver H. O., Tascioglu Y., Celebioglu K., Aradag S. Design and simulation of a SCADA system using SysML and Simulink. IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Madrid, Spain. 2013. P. 935–939. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2013.6749909>
12. Godlevskiy M. D., Orlovskiy D. L., Kopp A. M. Structural analysis and optimization of ideo functional business process models. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2018. № 3. P. 48–56. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-3-6>.
13. Siedashev O. Determination of Software Architecture (SOA) and Microservice Architecture (MSA) Usage Criteria. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Mathematical Modeling. Information Technology. Automated Control Systems". 2024. No. 2. <https://doi.org/10.26565/2519-2310-2024-2-04>
14. Parsons M., Bratanov D., Gaston K. J., Gonzalez L. F. UAVs, Hyperspectral Remote Sensing, and Machine Learning Revolutionizing Reef Monitoring. Sensors. 2018. Vol. 18, No. 7. <https://doi.org/10.3390/s18072026>
15. Худов Г. В., Калімулін Т. М., Хижняк І. А., Місюк Г. В., Сердюк О. В. Аналіз основних методів сегментування при тематичній обробці видових зображень. Системи обробки інформації. 2022. № 4 (171). С. 82-89. <https://doi.org/10.30748/soi.2022.171.09>
16. Llano E. G., Roig D. O., Cabrera Y. C. Unsupervised Segmentation of Agricultural Crops in UAV RGB Images. Revista Cubana de Ciencias Informáticas. 2018. Vol. 12, No. 4. P. 17–28. Available at: <https://www.redalyc.org/journal/3783/378365912002/html/>.
17. Manenti G., Ebrahimiarestan M., Yang L., Yu M. Functional Modelling and IDEF0 to Enhance and Support Process Tailoring in Systems Engineering. IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE). 2019. <https://doi.org/10.1109/ISSE46696.2019.8984539>
18. Moreno M., Turner C., Tiwari A., Hutabarat W., Charnley F., Widjaja D., Mondini L. Re-distributed Manufacturing to Achieve a Circular Economy: A Case Study Utilizing IDEF0 Modeling. Procedia CIRP. 2017. Vol. 63. P. 686-691.
19. Kumar A., Dhanwate S. SysML Based Modelling of Gear Shifting Strategy and Drivability for Automatic Transmission. Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1478(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1478/1/012008>
20. UML State Machine Diagrams: An Agile Introduction. URL: [https://agilemodeling.com/artifacts/statemachinediagram.htm?utm\\_source=chatgpt.com](https://agilemodeling.com/artifacts/statemachinediagram.htm?utm_source=chatgpt.com)
21. Гобов Д., Шевченко Н. Визначення архітектури вимог до ІТ-рішення як бізнес-аналітичного продукту. Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2024. № 1(27). С. 26–38. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.026>.
22. The C4 model for visualising software architecture. веб-сайт. URL : <https://c4model.com/>
23. TOGAF: ІТ-архітектура підприємства. веб-сайт. URL : <https://www.sso.net.ua/product/togaf/>
24. What is a 3-tier application architecture? Definition and Examples. веб-сайт. URL: [https://vfunction.com/blog/3-tier-application/?utm\\_source=chatgpt.com](https://vfunction.com/blog/3-tier-application/?utm_source=chatgpt.com)

25. Інструменти ІТ бізнес-аналітика для аналізу та специфікації Бізнесу/Системи. веб-сайт. URL: <https://www.ba.in.ua/2023/05/05/instrumenty-it-biznes-analytyka-dlya-analizu-ta-specyfykacziyi-biznesu-systemy-chastyna-i>
26. UX дизайнерам до уваги: топ кращих інструментів для прототипування. веб-сайт. URL : <https://dan-it.com.ua/uk/blog/ux-dyzajneram-do-uvagy-top-krashykh-instrumentiv-dlya-prototypuvannya>

Received (Надійшла) 30.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.08.2025

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

- Худов Геннадій Володимирович** – доктор технічних наук, професор, начальник кафедри тактики радіотехнічних військ, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;  
**Hennadii Khudov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Radar Troops Tactic, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [2345kh\\_hg@ukr.net](mailto:2345kh_hg@ukr.net); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-3311-2848>;  
Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57196079841>.
- Хижняк Ірина Анатоліївна** – доктор технічних наук, начальник НМВ забезпечення якості освітньої діяльності та вищої освіти, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;  
**Irina Khizhnyak** – Doctor of Technical Sciences, Head of Scientific and Methodological Department for Quality Assurance of Educational Process and Higher Education, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [khizh\\_ia@ukr.net](mailto:khizh_ia@ukr.net); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3431-7631>;  
Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57196075236>.
- Сальник Олег Вікторович** – старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії факультету післядипломної освіти Харківського національного університету повітряних сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;  
**Oleh Salnyk** – Senior Researcher, Scientific Research Department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [Oleh\\_Salnyk@gmail.com](mailto:Oleh_Salnyk@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2688-1198>.
- Минко Петро Євгенович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна;  
**Petro Mynko** – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics of Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [Petro\\_Mynko@gmail.com](mailto:Petro_Mynko@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2621-8900>.
- Андронов Віталій Віталійович** – кандидат технічних наук, старший дослідник, начальник відділу Науково-дослідного інституту Военної розвідки, Київ, Україна;  
**Vitalii Andronov** – PhD, Senior Researcher, Head of Department of Defence Intelligence Research Institute, Kyiv, Ukraine;  
e-mail: [Vitalii\\_Andronov@gmail.com](mailto:Vitalii_Andronov@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-1122-710X>.

#### Analysis of approaches to modeling and architectural representation of image processing information technology from onboard opto-electronic observation systems

Hennadii Khudov, Irina Khizhnyak, Oleh Salnyk, Petro Mynko, Vitalii Andronov

**Abstract.** The subject of the study in the article is the approaches to modeling and architectural representation of information technology. The aim is to analyze modeling approaches and architectural representation of image processing information technology from onboard optoelectronic observation systems. **Tasks:** to analyze existing approaches to modeling and architectural representation of information technologies, considering the specific features of image processing from onboard optoelectronic systems; to identify the most relevant approaches for the development of such technologies; and to provide recommendations for the application of unified models to ensure effective collaboration among specialists within a common technical environment. The **methods** used include analytical and empirical methods of comparative research, as well as methods for developing information technologies. The **following results were obtained:** the main approaches to modeling information technologies were analyzed and systematized, including functional, object-oriented, behavioral, and business modeling. It was determined that the effective design of image processing systems based on onboard optoelectronic platforms requires a comprehensive application of these approaches, depending on the specifics of the tasks. Architectural concepts such as monolithic, microservice, C4 model, TOGAF, and three-tier structures were also reviewed, which enable the formalization of the logic of complex IT solutions. In addition, modern tools for creating diagrams and models were described, supporting the design, verification, and documentation processes of such systems. The results can serve as a methodological basis for the development of information technologies in the field of onboard surveillance and similar complex technical systems. **Conclusions:** Modeling is a critically important component in the creation of information technologies for image processing from onboard optoelectronic systems. The effectiveness of such IT solutions is ensured through the integrated application of various modeling and architectural design approaches, allowing both technical and business requirements to be addressed. The combination of functional, object-oriented, behavioral, and business models, along with the use of modern architectural solutions and tools, contributes to the creation of reliable, scalable, and adaptive systems. Thus, modeling serves as a key factor in the successful development of complex information technologies in the field of optoelectronic observation. The research was conducted with grant support from the National Research Foundation of Ukraine within the framework of the "Science for Strengthening Ukraine's Defense Capability" competition, project title "Information Technology for Automated Image Segmentation of Objects in Strike FPV Drone Targeting Systems Based on Swarm Intelligence Algorithms," registration number 2023.04/0153.

**Keywords:** information technology, modeling of information technology, architectural representation of information technology, image processing from onboard opto-electronic observation systems.

О. В. Шматко, Д. О. Малишенко, О. Б. Волощук

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ КЛІЄНТІВ: АРХІТЕКТУРА, РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

**Анотація.** **Актуальність.** У сучасних умовах цифрової трансформації бізнес-процесів зростає потреба у розробці інтелектуальних інформаційних систем для аналізу та обробки великих обсягів клієнтських даних. Одним із важливих напрямів є автоматизована класифікація клієнтів з використанням алгоритмів машинного навчання, що дозволяє підвищити ефективність маркетингових стратегій та прийняття управлінських рішень. **Об'єкт дослідження:** процеси класифікації клієнтів в інформаційних системах із використанням методів машинного навчання. **Мета статті:** проектування, реалізація та дослідження архітектури програмних компонентів інформаційної системи для інтелектуальної класифікації клієнтів з урахуванням вимог до масштабованості, продуктивності та точності алгоритмів класифікації. **Результати дослідження.** У статті запропоновано архітектурну модель інформаційної системи, яка включає модуль збору, обробки та класифікації клієнтських даних. Реалізовано низку програмних компонентів, що інтегрують алгоритми машинного навчання (логістична регресія, дерева рішень, метод опорних векторів). Проведено експериментальні дослідження на основі реального набору даних, що продемонстрували високу точність класифікації та ефективність системи в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. **Висновки.** Розроблена інформаційна система забезпечує точну класифікацію клієнтів і може бути застосована в комерційних аналітичних платформах. Результати дослідження можуть бути використані для подальшого вдосконалення інтелектуальних програмних систем аналізу даних.

**Ключові слова:** інформаційна система; класифікація клієнтів; машинне навчання; програмна архітектура; логістична регресія; дерева рішень; експериментальне дослідження.

### Вступ

**Постановка проблеми.** В умовах сучасного конкурентного ринку ефективна взаємодія з клієнтами є одним із ключових факторів успішного функціонування компаній. Зростання обсягів даних, що генеруються в процесі комунікації з клієнтами, створює нові можливості для аналізу поведінки споживачів і формування персоналізованих бізнес-стратегій [1]. Одним із найважливіших інструментів у цьому контексті є сегментація клієнтів — процес поділу клієнтської бази на окремі групи за спільними характеристиками, такими як демографічні ознаки, купівельна поведінка, місцезнаходження, онлайн-активність або психографічні особливості [2].

Сегментація дозволяє компаніям краще розуміти потреби різних категорій споживачів, оптимізувати маркетингові кампанії, покращити клієнтський досвід і підвищити рівень лояльності до бренду. Сучасні підходи до сегментації дедалі частіше ґрунтуються на використанні методів машинного навчання, що забезпечують більш точний, гнучкий і масштабований аналіз великих обсягів даних. Алгоритми класифікації дозволяють автоматизовано виявляти закономірності в поведінці клієнтів, ідентифікувати ключові відмінності між групами та формувати обґрунтовані рекомендації для прийняття управлінських рішень.

Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю пошуку ефективних програмних рішень для побудови систем класифікації клієнтів із застосуванням сучасних алгоритмів інтелектуального аналізу даних. Такий підхід дає змогу компаніям не лише краще розуміти структуру своєї клієнтської бази, а й значно підвищити ефективність бізнес-процесів, що базуються на персоналізованій взаємодії.

У цьому контексті дана робота спрямована на розробку та реалізацію програмних компонентів для системи класифікації клієнтів компанії з використанням методів машинного навчання. Основна увага приділяється аналізу ключових факторів, які впливають на якість сегментації, вибору відповідних алгоритмів, а також впровадженню архітектурних рішень, здатних забезпечити масштабованість, точність і зручність застосування в реальних умовах бізнесу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Класичні підходи до сегментації базуються на демографічних і географічних характеристиках [1], [2]. Однак сучасні методи передбачають використання поведінкових і транзакційних даних, а також алгоритмів машинного навчання. Зокрема, у роботах Kotler і Keller [1] та Wedel і Kamakura [2] закладено концептуальні основи сегментації, які стали фундаментом для подальших прикладних досліджень.

Найбільш поширеним методом кластеризації є K-means, який дозволяє ефективно групувати споживачів на основі подібності поведінкових ознак. Його використання описано в дослідженнях Jain [3], Kumar S. [4], Tabianan, K., та інші [5], де продемонстровано ефективність цього алгоритму в електронній комерції, банківській справі та сфері обслуговування. Однак K-means має низку обмежень, зокрема чутливість до вибору початкових центрів кластерів і необхідність заздалегідь визначати кількість груп. У зв'язку з цим у науковій літературі запропоновано кілька модифікацій. Так, в роботі [6] поєднано K-means із методом головних компонентів (PCA), а Huang, S. та інші [7] застосували варіант K-medoids для підвищення стійкості кластеризації до викидів.

Ієрархічна кластеризація є ще одним популярним методом, що дозволяє побудову дерева кластерів із можливістю їх динамічного виділення. Дослі-

дження [8] та [9] ілюструють застосування цього методу у телекомунікаціях та роздрібній торгівлі. В роботі [10] представили модифікований варіант ієрархічної кластеризації на основі бінарного розщеплення.

Нечітка кластеризація (fuzzy clustering) дозволяє клієнтам належати до кількох сегментів одночасно з різним ступенем приналежності. Такий підхід продемонстровано в роботі [11]. Використання нейронних мереж для кластеризації розглянуто в дослідженні [12], де алгоритм успішно сегментує клієнтів телекомунікаційної компанії.

Метод опорних векторів (SVM) продемонстрував хороші результати у задачах класифікації клієнтів у сфері e-commerce, як показано у дослідженні [13]. Автори роботи [14] запропонували гібридний підхід, який об'єднує переваги K-means та ієрархічної кластеризації. В роботі [15] застосовано fuzzy clustering у поєднанні з глибокими нейронними мережами, що дозволило досягти високої точності.

Автори статті [16] використали autoencoder-мережі для зменшення розмірності даних перед застосуванням DBSCAN кластеризації. У дослідженні [17] розглянуто вплив попередньої обробки даних на точність сегментації. В роботі [18] виконано порівняння результатів традиційних і гібридних підходів до кластеризації. В роботі [19] розглянуто сегментацію в реальному часі з використанням потокових даних.

В роботі [20] застосовані методи глибинного навчання до аналізу поведінки клієнтів у банківській сфері. Водночас в роботі [21] аналізується застосування нейронних мереж у прогнозуванні відтоку клієнтів. В роботі [22] проводиться аналіз гібридних систем для сегментації в страхових компаніях. Автори роботи [23] пропонують адаптивну модель кластеризації, що самостійно визначає кількість сегментів. В роботі [24] досліджується інтерпретованість моделей класифікації, що важливо для прийняття рішень у бізнесі. В останніх роботах, зокрема [25], розглядаються перспективи інтеграції класифікації клієнтів із CRM-системами.

Таким чином, наукова література демонструє широкий спектр підходів до класифікації клієнтів із використанням машинного навчання. Вибір конкретного методу залежить від структури даних, розміру вибірки та цілей бізнесу. Перспективним є подальше дослідження гібридних моделей і адаптивних алгоритмів, що дозволяють гнучко реагувати на зміни в поведінці клієнтів.

**Метою роботи** є розробка методичного підходу і програмного засобу для класифікації клієнтів компанії з використанням алгоритмів машинного навчання, що дозволить покращити якість сегментації та забезпечити підтримку управлінських рішень.

### Основний матеріал

Архітектура системи кластеризації клієнтів у бізнес-середовищі являє собою багаторівневу структурну модель, яка забезпечує послідовну обробку, трансформацію, аналіз та інтерпретацію клієнтських даних з метою отримання релевантної інформації

для прийняття управлінських рішень. Побудова такої архітектури ґрунтується на принципах виявлення знань у базах даних (knowledge discovery in databases, KDD), де кожен етап слугує логічним продовженням попереднього та забезпечує підготовку даних для подальшої аналітичної обробки. Узагальнене представлення цієї архітектури наведено на рисунку 1, що ілюструє основні функціональні блоки системи та напрямки їх взаємодії.

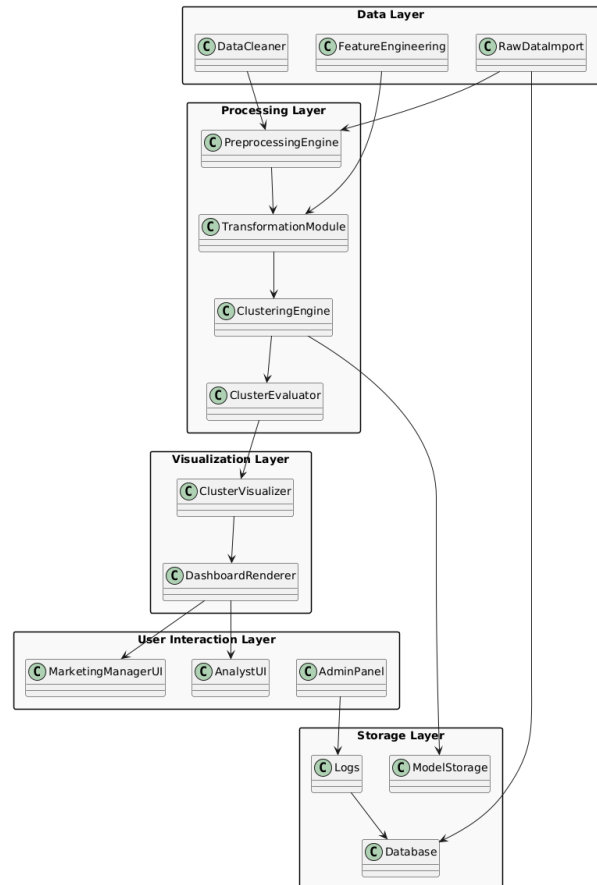


Рис. 1. Архітектура інтелектуальної системи кластеризації клієнтів

Початковим етапом є обробка вхідних даних, які надходять із різноманітних джерел, включаючи CRM-системи, транзакційні бази, маркетингові платформи, файли користувацької активності та інші інформаційні масиви. Вхідні дані можуть мати неоднорідну структуру, містити пропущені або дубльовані значення, а також потребувати перетворення форматів. У зв'язку з цим, першочерговою задачею архітектури є попередня обробка даних (pre-processing), що передбачає очищення, нормалізацію, агрегування та стандартизацію інформації. Результатом цього етапу є підготовлений набір даних, придатний для подальшої аналітики.

Після очищення дані проходять через фазу трансформації, де здійснюється приведення множинних джерел до уніфікованого формату ознак. На цьому етапі можуть виконуватись операції злиття датасетів, розрахунку нових змінних, а також відбір релевантних ознак на основі статистичних або евристичних критеріїв. Сформований у такий спосіб вектор

ознак подається на вхід сегментаційного модуля системи, де реалізується кластеризація клієнтів.

Сегментація являє собою ключовий етап архітектури, в межах якого здійснюється побудова кластерів за допомогою одного або кількох алгоритмів машинного навчання. У залежності від характеру даних та бізнес-задач можуть використовуватись методи K-means, DBSCAN, Fuzzy C-means, ієрархічна кластеризація або самоорганізовані карти (SOM). Метою даного етапу є виявлення внутрішньої структури даних і формування гомогенних груп клієнтів, які характеризуються схожими поведінковими або демографічними параметрами. Як правило, у результаті первинної кластеризації утворюється велика кількість груп, значна частина яких може бути нерепрезентативною або дублюючою.

Для оптимізації результатів кластеризації наступним етапом є оцінювання сформованих кластерів з метою їх селекції та фільтрації. Оцінка якості кластерів здійснюється на основі внутрішніх метрик, таких як коефіцієнт силуету, індекс Девіса-Боулдіна, індекс Калінського-Харабаза тощо. Цей процес дозволяє відібрати найбільш значущі кластери, що мають внутрішню узгодженість і добре відділені один від одного, забезпечуючи максимальну цінність з точки зору подальшої інтерпретації.

Після того як обрано найбільш релевантні кластери, система переходить до фази візуалізації. На цьому етапі дані подаються у графічному вигляді, що полегшує аналіз результатів класифікації навіть для користувачів, які не мають глибокої технічної підготовки. Візуалізація може включати дво- або тривимірне зображення кластерів (з використанням методів зниження розмірності, таких як PCA або t-SNE), гістограми, діаграми розподілу, а також дашборди з ключовими характеристиками кожної групи. Завдяки цьому користувачі системи отримують зручні інструменти для інтерпретації та подальшого використання кластеризаційних результатів.

Фінальним етапом архітектури є інтерпретація результатів та здобуття знань (manual investigation). На цьому рівні бізнес-аналітики, маркетологи або інші фахівці аналізують класифіковані сегменти, формують висновки, генерують гіпотези та приймають управлінські рішення. Отримані знання можуть бути використані для розробки персоналізованих маркетингових кампаній, прогнозування поведінки клієнтів, покращення клієнтського досвіду або оптимізації роботи з окремими сегментами.

Описана архітектура системи кластеризації клієнтів реалізує принцип наскрізного циклу обробки даних – від початкового збору до практичного застосування знань. Її модульна структура дозволяє масштабування, гнучке налаштування під конкретні задачі та інтеграцію з іншими корпоративними інформаційними системами. Таким чином, вона є ефективним інструментом аналітики в умовах сучасного бізнес-середовища, що характеризується динамічністю, високою конкуренцією та необхідністю прийняття швидких і точних рішень на основі даних.

В роботі розглянуто ключові методи машинного навчання, які активно застосовуються для задач кла-

сифікації клієнтів. Увагу зосереджено на чотирьох популярних підходах: дерева рішень (Decision Tree, DT), метод опорних векторів (Support Vector Machines, SVM), метод k-ближчих сусідів (K-Nearest Neighbors, KNN) та випадковий ліс (Random Forest, RF). Дерева рішень (Decision Tree, DT). Метод дерев рішень є одним із найдавніших підходів у машинному навчанні, що активно використовується з 1970-х років. Ключовим елементом алгоритму є визначення нечистоти вузлів. Для цього використовуються показники Gini-індексу або ентропії:

$$Gini = 1 - \sum p_i^2 = 1 - \left( \frac{n_g}{n} \right)^2 - \left( \frac{n_b}{n} \right)^2,$$

де  $p_i$  — ймовірність належності до класу,  $n_g$  та  $n_b$  — кількість об'єктів у позитивному та негативному класах відповідно.

Ентропія:

$$Entropy = - \sum p_i \log p_i = - (p_g \log p_g + p_b \log p_b).$$

Метод опорних векторів (Support Vector Machines, SVM). Метод опорних векторів є потужним інструментом для класифікації та регресії, який набув широкого використання з 1990-х років. Основна мета SVM – знайти оптимальну гіперплощину, яка максимально розділяє класи у багатовимірному просторі. Рівняння гіперплощини:

$$\vec{w}^T \vec{u} + b = 0,$$

де  $\vec{w}$  – вектор ваг,  $b$  – зміщення,  $u$  – вектор ознак.

Метод k-ближчих сусідів (K-Nearest Neighbors, KNN). Алгоритм KNN базується на концепції просторової близькості даних. Для нового об'єкта визначається відстань до інших точок у навчальній вибірці, після чого він класифікується за більшістю голів його  $k$  найближчих сусідів.

Формула обчислення відстані у  $n$ -вимірному просторі:

$$D(x_1, x_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{1i} - x_{2i})^2}.$$

Випадковий ліс (Random Forest, RF). Метод випадкового лісу є ансамблевим методом, що поєднує кілька дерев рішень. Алгоритм формує випадкову вибірку ознак, створює для кожної вибірки окреме дерево, а підсумкове рішення приймається за принципом більшості.

Алгоритм також використовує матрицю близькості між об'єктами, яка конвертується у матрицю відстаней для подальшої обробки (наприклад, за допомогою багатовимірного шкалювання).

З метою реалізації системи кластеризації клієнтів у рамках цієї дипломної роботи було розгорнуто експериментальний стенд, що ґрунтується на мові програмування Python, яка є однією з провідних технологій у сфері машинного навчання, аналізу даних та побудови аналітичних рішень. Завдяки своїй гнучкості, зручному синтаксису та наявності великої кількості спеціалізованих бібліотек Python дозволяє ефективно виконувати всі етапи циклу обробки даних — від завантаження та очищення до побудови моделей класифікації та візуалізації результатів.

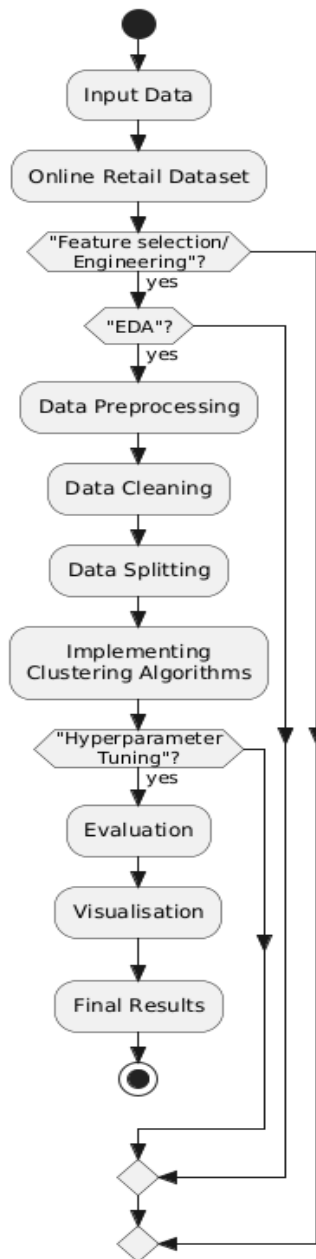


Рис. 2. Потік даних в інтелектуальній системі кластеризації клієнтів

Потік даних для експериментального середовища представлено на рис. 2. Він охоплює послідовність етапів, необхідних для обробки вхідних даних, навчання моделей кластеризації, їхньої валідації та подальшої інтерпретації. Початковим етапом є завантаження вхідного набору даних — у цьому випадку використано набір онлайн-рітейл-даних, який містить інформацію про клієтські транзакції. Вхідні дані подаються у систему за допомогою модуля *pandas*, що використовується для статистичного аналізу та обробки структурованих таблиць.

Після завантаження даних виконується первинне дослідження даних (EDA — Exploratory Data Analysis), у процесі якого аналізуються розподіли, виявляються пропущені значення, аномалії та кореляційні зв'язки. Для цього використовуються бібліотеки *pandas*, *numpy*, *matplotlib* та *seaborn*, які забезпечують статистичну обробку та графічне представ-

лення розподілів. На основі отриманих результатів виконується відбір ознак і побудова нових змінних (feature engineering), що сприяє покращенню якості класифікації клієнтів. Далі дані проходять етап попередньої обробки, який включає масштабування числових ознак (*MinMaxScaler*, *StandardScaler*), кодування категоріальних змінних (*LabelEncoder*), а також очищення та нормалізацію значень. Після очищення відбувається розділення даних на навчальну та тестову вибірки, що дозволяє здійснити незалежну перевірку якості кластеризації. Модулі *train\_test\_split* із *sklearn* дозволяють провести це розділення із заданою часткою валідаційної вибірки.

У подальшому здійснюється реалізація алгоритмів кластеризації, серед яких застосовано: *KMeans*, *DBSCAN*, *GaussianMixture*, а також *PCA* — для попереднього зменшення розмірності. Для кожного з алгоритмів виконується налаштування гіперпараметрів із використанням *RandomizedSearchCV*, що дозволяє підібрати оптимальні конфігурації моделей. У процесі моделювання також застосовуються спеціалізовані функції для оцінювання якості кластеризації — *silhouette\_score*, *calinski\_harabasz\_score*, *davies\_bouldin\_score*, які дають змогу обрати найкращу модель на основі формальних метрик.

Оцінювання точності та стабільності моделей здійснюється на основі порівняльного аналізу результатів кластеризації. Результати класифікації відображаються у вигляді дво- та тривимірних графіків, побудованих за допомогою *matplotlib* та *seaborn*, що дозволяє візуалізувати просторове розташування кластерів і зрозуміти логіку розподілу клієнтів за сегментами. На завершальному етапі формуються підсумкові результати, які можуть бути інтегровані у бізнес-аналітику для створення персоналізованих пропозицій або адаптації маркетингових стратегій. Отримані знання можуть бути збережені у базу даних або передані до зовнішніх інформаційних систем. Створений експериментальний стенд відображає повний цикл класифікації клієнтів — від імпорту даних і підготовки вибірки до кластеризації, оцінювання результатів і побудови висновків, що є базою для прийняття рішень у бізнес-середовищі. У рамках даного дослідження було використано відкритий набір даних зі сфери роздрібної торгівлі, який отримано з *UCI Machine Learning Repository* — одного з найавторитетніших джерел у сфері машинного навчання. Конкретно було використано *Online Retail Dataset*, який знаходиться у вільному доступі за посиланням: <https://archive.ics.uci.edu/dataset/352/online+retail>.

Вибір цього набору даних зумовлений його обсягом, структурованістю, а також широким застосуванням у наукових публікаціях, присвячених задачам кластеризації клієнтів та поведінкової аналітики у сфері електронної комерції. Набір містить 541 909 записів, що охоплюють інформацію про транзакції, здійснені в період з грудня 2010 по грудень 2011 року однією з онлайн-компаній, що базується у Великобританії та займається продажем подарункових товарів. Кожен запис у наборі відповідає окремій товарній позиції у певному замовленні. Опис набору даних представлений в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики датасету Online Retail,

Назва змінної	Формат / Тип значень	Опис
InvoiceNo	Ціле число (6 цифр), текст	Унікальний номер рахунку-фактури. Початок з "С" означає скасування.
StockCode	Ціле число (5 цифр), текст	Ідентифікатор товарної позиції.
Description	Текстовий рядок	Назва або опис товару.
Quantity	Ціле число	Кількість придбаних одиниць товару.
InvoiceDate	Дата і час	Час створення рахунку-фактури.
UnitPrice	Дійсне число (float)	Ціна за одиницю товару (у фунтах стерлінгів).
CustomerID	Ціле число (5 цифр), текст	Унікальний ідентифікатор клієнта.
Country	Текстовий рядок	Назва країни проживання клієнта.

Оцінювання якості кластеризації є критично важливим етапом у процесі сегментації клієнтів, оскільки дозволяє кількісно визначити, наскільки добре сформовані кластери відображають реальні закономірності у даних. У межах цього дослідження для валідації кластеризаційних моделей використано три основні метрики: Silhouette Score, індекс Калінські-Харабаза (Calinski-Harabasz Index) та індекс Девіса-Боулдіна (Davies-Bouldin Index). Кожна з них забезпечує специфічну оцінку когезійності (внутрішньої узгодженості) кластерів та ступеня їх відокремлення один від одного в багатовимірному просторі ознак.

На першому етапі для кожного клієнта було обчислено значення RFM-показників. Зокрема, Recency визначалась як кількість днів з моменту останньої покупки до дати завершення спостереження, Frequency – як кількість унікальних транзакцій, здійснених клієнтом, а Monetary – як загальна сума витрат за всі замовлення.

На основі отриманих RFM показників було реалізовано поділ клієнтів на п'ять основних категорій (рис. 3): Top customers – клієнти з RFM-скором вище 4.5; High-value customers – більше 4.0; Medium-value customers – більше 3.0; Low-value customers – більше 1.6; Lost customers – нижче або дорівнює 1.6.

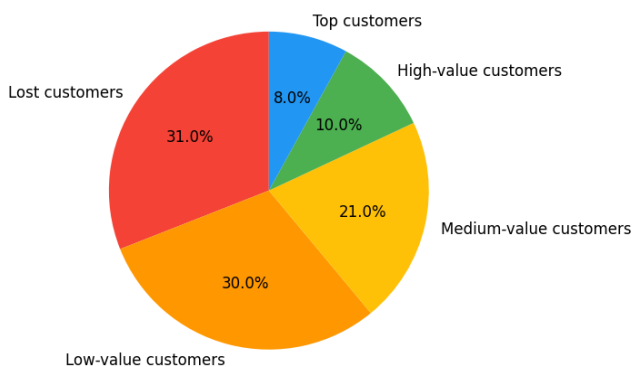


Рис. 3. Розподіл клієнтів за сегментами RFM аналізу

Результати RFM-аналізу показали, що лише близько п'ятої частини клієнтів здійснюють регулярні та високовартісні покупки. Це свідчить про потенціал до оптимізації взаємодії з менш активними клієнтами шляхом впровадження персоналізованих кампаній, систем лояльності та рекомендаційних сервісів. У якості одного з основних алгоритмів кластеризації було застосовано K-Means, який широко використовується завдяки своїй простоті реалізації та ефективності для великих обсягів даних. Для визначення оптимальної кількості кластерів (k) було використано метод "лікоть" (elbow method).

На основі візуального аналізу графіка (рис. 4) було встановлено, що оптимальна кількість кластерів дорівнює 3, оскільки саме при цьому значенні спостерігається найбільш виражений злам інерції. Після визначення параметра k було проведено масштабування ознак за допомогою Min-Max Normalization, щоб привести всі числові значення до одного діапазону. Це дозволяє уникнути зміщення в результатах кластеризації, яке може виникнути через дисбаланс у масштабах окремих ознак, особливо з огляду на те, що K-Means використовує евклідову відстань як метрику подібності.

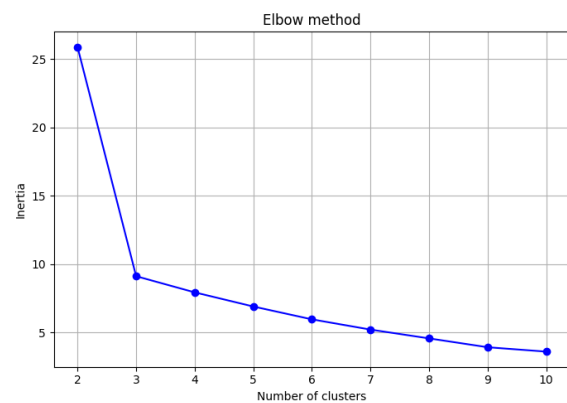


Рис. 4. Визначення кількості кластерів за «elbow method»

Після масштабування було побудовано кластеризаційну модель методом K-Means з трьома кластерами. Результати моделі візуалізовано у вигляді діаграми розсіювання (scatter plot), де кожна точка представляє клієнта, а колір позначає кластер, до якого його віднесено (рис. 5).



Рис. 5. Діаграма розсіювання (scatter plot) для k=3

Для виконання кластеризації за допомогою моделі Gaussian Mixture Model (GMM) попередньо бу-

ло застосовано метод головних компонент (Principal Component Analysis, PCA) з метою зниження розмірності вхідних даних. На рис. 6 представлено візуалізацію результатів кластеризації, отриманих за допомогою Gaussian Mixture Model.

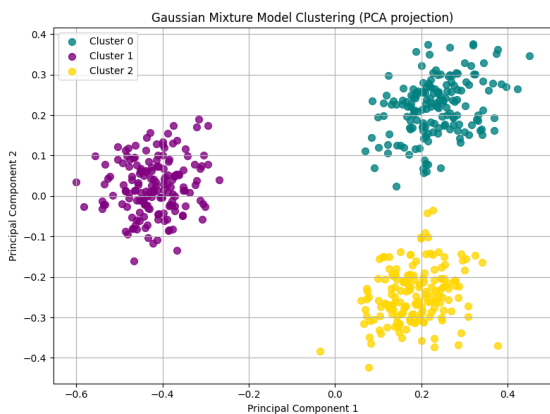


Рис. 6. Візуалізація результатів кластеризації методом Gaussian Mixture Model у просторі P1–P2

Перед застосуванням DBSCAN дані було нормалізовано за допомогою стандартного масштабування, що дозволило вирівняти внесок усіх ознак у обчислення відстаней. Основними параметрами алгоритму є:

- $\epsilon$  — радіус околу точки, який визначає максимальну відстань між точками в межах одного кластера;
- $\min\_samples$  — мінімальна кількість точок у межах околу, необхідна для того, щоб точку вважати основною (core point).

Для підбору оптимального значення параметра  $\epsilon$  було використано K-distance графік, який демонструє відстані до найближчих сусідів для кожної точки. Попри труднощі у точному визначенні зламу (knee point), експериментальним шляхом було встановлено, що значення  $\epsilon = 0.3$  забезпечує найкращу кластеризацію з точки зору розділення даних та стабільності результатів.

Після виконання DBSCAN-кластеризації кожній точці було присвоєно відповідну мітку кластера, а точки, які не мали достатньої кількості сусідів у межах  $\epsilon$ , були класифіковані як шумові та отримали мітку -1. Для обчислення загальної кількості кластерів у вибірці враховувалися лише валідні (ненульові) кластери, тобто кількість унікальних міток без урахування шумових точок.

На рис. 7 представлено результати кластеризації методом DBSCAN у двовимірному просторі.

На рис. 8 наведено графічну візуалізацію результатів кластеризації за допомогою BIRCH.

Алгоритм BIRCH (Balanced Iterative Reducing and Clustering using Hierarchies) є ефективним засобом ієрархічної кластеризації, спеціально розробленим для обробки великих масивів даних за обмежених ресурсів пам'яті. Однією з ключових переваг BIRCH є його здатність до інкрементального побудування кластерної структури, що забезпечує масштабованість та високу швидкодію під час обробки реальних бізнес-сценаріїв.

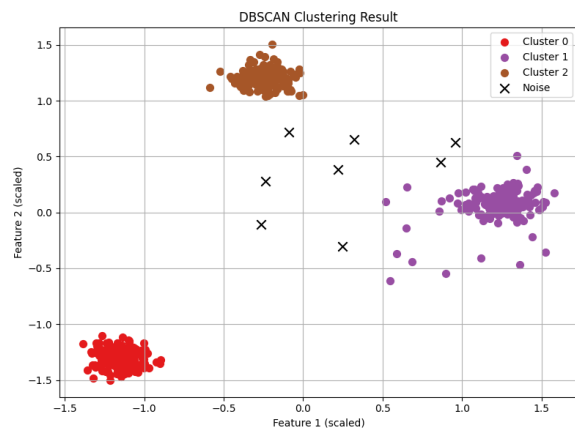


Рис. 7. Візуалізація результатів кластеризації методом DBSCAN

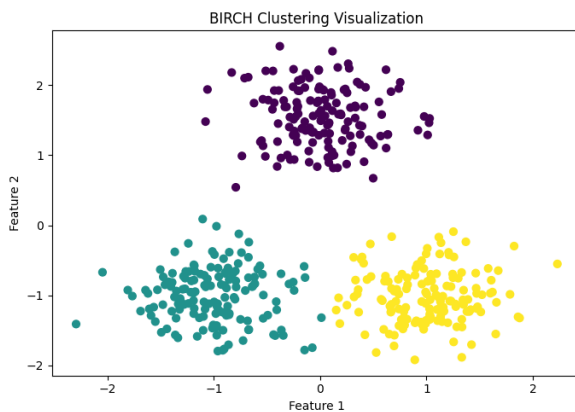


Рис. 8. Візуалізація кластеризації методом BIRCH

Ключовим параметром алгоритму є поріг (threshold), який визначає максимальний допустимий діаметр підкластерів, що формуються на кожному етапі побудови дерева кластерів (CF Tree)

У межах експерименту було протестовано низку порогових значень у діапазоні від 0.01 до 1.0. На основі аналізу метрики Silhouette Score найкращі результати були досягнуті при значенні  $\text{threshold} = 0.01$ , що дозволило сформувати чітко відокремлені та структурно збалансовані групи. Кількість виявлених кластерів за такого налаштування склала три, що відповідає очікуваній кластерній структурі на основі вхідних ознак.

У межах даного дослідження було проведено порівняльну оцінку ефективності кластеризаційних алгоритмів на основі показника Silhouette Score. До аналізу було включено такі методи: Gaussian Mixture Model (GMM), K-Means, BIRCH, DBSCAN. Обрані алгоритми забезпечили побудову кластерів із мінімальними обчислювальними витратами, що робить їх придатними для обробки масивів даних із невеликою кількістю вимірів. За результатами моделювання було встановлено, що модель GMM у поєднанні з попереднім зниженням розмірності методом PCA забезпечила найвищий показник Silhouette Score, який склав 0.80 (рис. 9). Це свідчить про чітке відокремлення кластерів та мінімальне перекриття між ними. Візуальний аналіз підтвердив високу згуртованість елементів у межах кожної групи, що дозволяє припустити відсутність хибно класифікованих

об'єктів. Такий результат пояснюється здатністю GMM моделювати варіацію даних у кожному кластері, що забезпечує гнучкість та точність розподілу.

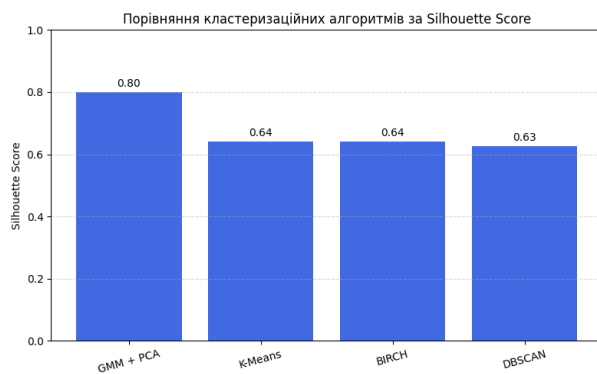


Рис. 9. Порівняння алгоритмів кластеризації

Методи BIRCH та DBSCAN показали помірні результати, зважаючи на те, що обидва орієнтовані на щільність та відстані між точками, а не на параметричне моделювання розподілів. Їхня перевага проявляється в обробці великих масивів даних і роботи з нестандартними формами кластерів, особливо у випадках високої розмірності. Однак у даному дослідженні, завдяки зниженню розмірності за допомогою PCA, GMM зміг продемонструвати кращі результати.

Метод K-Means показав результат зі значенням Silhouette Score на рівні 0.64. При цьому в ході де-

кількох запусків моделі з різними ініціалізаціями центроїдів було зафіксовано варіативність результатів у межах 0.06, що є типовою особливістю цього методу. Вона обумовлена стохастичним характером вибору початкових кластерів, що може впливати на кінцеву якість розбиття, особливо в задачах, пов'язаних із великими наборами даних.

Загалом результати свідчать про ефективність поєднання PCA + GMM для кластеризації клієнтів за комплексними ознаками. Цей підхід дозволяє виявляти глибокі закономірності в поведінці об'єктів без втрати критичної інформації, що робить його перспективним для бізнес-аналітики, персоналізованого маркетингу та систем рекомендацій.

## Висновки

Результати роботи підтвердили доцільність та ефективність використання методів машинного навчання для задач класифікації клієнтів. Розроблена система може бути адаптована для використання у сфері електронної комерції, банківського обслуговування, телекомунікацій, а також в інших галузях, де важливим є аналіз споживчої поведінки. Практична реалізація створеного рішення дозволяє інтегрувати його у більш широкі інформаційно-аналітичні платформи з метою автоматизації процесів прийняття управлінських рішень, що відкриває перспективи для подальших досліджень у напрямку інтеграції кластеризації з предиктивними моделями та рекомендаційними системами.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Kotler, P., Keller, K. L., Brady, M., Goodman, M., & Hansen, T. (2016). *Marketing Management 3rd edn* PDF eBook. Pearson Higher Ed.
- Wedel, M., & Kamakura, W. A. (2000). *Market segmentation: Conceptual and methodological foundations*. Springer Science & Business Media.
- Jain, A. K. (2010). Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern recognition letters*, 31(8), 651-666. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-87479-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-87479-9_3)
- Kumar, S., Rani, R., Pippal, S. K., & Agrawal, R. (2025). Customer segmentation in e-commerce: K-means vs hierarchical clustering. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 23(1), 119-128. DOI: <http://doi.org/10.12928/telkomnika.v23i1.26384>
- Tabianan, K., Velu, S., & Ravi, V. (2022). K-means clustering approach for intelligent customer segmentation using customer purchase behavior data. *Sustainability*, 14(12), 7243. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14127243>
- Zhao, Y., & Zhou, X. (2021, April). K-means clustering algorithm and its improvement research. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1873, No. 1, p. 012074). IOP Publishing. DOI: 10.1088/1742-6596/1873/1/012074
- Huang, S., Kang, Z., Xu, Z., & Liu, Q. (2021). Robust deep k-means: An effective and simple method for data clustering. *Pattern Recognition*, 117, 107996. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2021.107996>
- Jothi, R., Muthukumaran, K. (2022). Telecom Customer Segmentation Using Deep Embedded Clustering Algorithm. In: Alyoubi, B., Ben Ncir, CE., Alharbi, I., Jarbou, A. (eds) *Machine Learning and Data Analytics for Solving Business Problems. Unsupervised and Semi-Supervised Learning*. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-18483-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-18483-3_5)
- Cendana, M., & Kuo, R. J. (2024). Categorical data clustering: A bibliometric analysis and taxonomy. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 6(2), 1009-1054. DOI: <https://doi.org/10.3390/make6020047>
- Lee, Z. J., Lee, C. Y., Chang, L. Y., & Sano, N. (2021). Clustering and classification based on distributed automatic feature engineering for customer segmentation. *Symmetry*, 13(9), 1557. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym13091557>
- Kumaresan, S. P., Tan, C. K., & Ng, Y. H. (2021). Deep neural network (dnn) for efficient user clustering and power allocation in downlink non-orthogonal multiple access (noma) 5g networks. *Symmetry*, 13(8), 1507. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym13081507>
- Xiahou, X., & Harada, Y. (2022). B2C E-commerce customer churn prediction based on K-means and SVM. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 17(2), 458-475. DOI: <https://doi.org/10.3390/jtaer17020024>
- Liu, R., Ali, S., Bilal, S. F., Sakhawat, Z., Imran, A., Almuhaimeed, A., ... & Sun, G. (2022). An intelligent hybrid scheme for customer churn prediction integrating clustering and classification algorithms. *Applied Sciences*, 12(18), 9355. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12189355>
- Altameem, A. A., & Hafez, A. M. (2022). Behavior analysis using enhanced fuzzy clustering and deep learning. *Electronics*, 11(19), 3172. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11193172>

15. Yan, X., Li, Y., Nie, F., & Li, R. (2025). Bank Customer Segmentation and Marketing Strategies Based on Improved DBSCAN Algorithm. *Applied Sciences* (2076-3417), 15(6). DOI: 10.3390/app15063138
16. Alshdaifat, E. A., Alshdaifat, D. A., Alsarhan, A., Hussein, F., & El-Salhi, S. M. D. F. S. (2021). The effect of preprocessing techniques, applied to numeric features, on classification algorithms' performance. *Data*, 6(2), 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/data6020011>
17. Abdulrazzak, H. N., Hock, G. C., Mohamed Radzi, N. A., Tan, N. M., & Kwong, C. F. (2022). Modeling and analysis of new hybrid clustering technique for vehicular ad hoc network. *Mathematics*, 10(24), 4720. DOI: <https://doi.org/10.3390/math10244720>
18. Chaudhry, M., Shafi, I., Mahnoor, M., Vargas, D. L. R., Thompson, E. B., & Ashraf, I. (2023). A systematic literature review on identifying patterns using unsupervised clustering algorithms: A data mining perspective. *Symmetry*, 15(9), 1679. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym15091679>
19. Najeh, H., Lohr, C., & Leduc, B. (2022). Dynamic segmentation of sensor events for real-time human activity recognition in a smart home context. *Sensors*, 22(14), 5458. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22145458>
20. Domingos, E., Ojeme, B., & Daramola, O. (2021). Experimental analysis of hyperparameters for deep learning-based churn prediction in the banking sector. *Computation*, 9(3), 34. DOI: <https://doi.org/10.3390/computation9030034>
21. Saha, L., Tripathy, H. K., Gaber, T., El-Gohary, H., & El-kenawy, E. S. M. (2023). Deep churn prediction method for telecommunication industry. *Sustainability*, 15(5), 4543. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15054543>
22. Chen, Y. S., Lin, C. K., Chou, J. C. L., Chen, S. F., & Ting, M. H. (2022). Application of advanced hybrid models to identify the sustainable financial management clients of long-term care insurance policy. *Sustainability*, 14(19), 12485. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141912485>
23. Jiang, W., Song, C., Wang, H., Yu, M., & Yan, Y. (2023). Obstacle detection by autonomous vehicles: An adaptive neighborhood search radius clustering approach. *Machines*, 11(1), 54. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11010054>
24. Banegas-Luna, A. J., Pe?a-Garc?a, J., Iftene, A., Guadagni, F., Ferroni, P., Scarpato, N., ... & Prez-S?nchez, H. (2021). Towards the interpretability of machine learning predictions for medical applications targeting personalised therapies: a cancer case survey. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(9), 4394. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms22094394>
25. Eslami, E., Razi, N., Lonbani, M., & Rezazadeh, J. (2024). Unveiling IoT Customer Behaviour: Segmentation and Insights for Enhanced IoT-CRM Strategies: A Real Case Study. *Sensors*, 24(4), 1050. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24041050>

Received (Надійшла) 12.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.08.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Шматко Олександр Віталійович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ЕОМ, Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Oleksandr Shmatko** – PhD, Ass.prof, Ass.prof of the Department of electronic computers, Kharkiv National University of radio electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [oleksandr.shmatko2@nure.ua](mailto:oleksandr.shmatko2@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2426-900X>

Scopus Author ID: <http://www.scopus.com/inward/authorDetails.url?authorID=6602623478&partnerID=MN8TOARS>

**Малишенко Дар'я Олександрівна** – магістр кафедри ЕОМ, Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Daria Malysenko** – Master degree student, of the Department of electronic computers, Kharkiv National University of radio electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [daria.malysenko@nure.ua](mailto:daria.malysenko@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0001-4560-2019>.

**Волощук Олена Борисівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ЕОМ Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Olena Voloshchuk** – PhD, Ass.prof, Ass.prof of the Department of electronic computers, Kharkiv National University of radio electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [olena.voloshchuk@nure.ua](mailto:olena.voloshchuk@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-5912-4126>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57207762084>.

### Information system for intelligent customer classification: architecture, implementation, and experimental research

Oleksandr Shmatko, Daria Malysenko, Olena Voloshchuk

**Abstract. Relevance.** In the context of ongoing digital transformation of business processes, there is a growing demand for intelligent information systems capable of analyzing and processing large volumes of customer data. One of the key directions in this field is automated customer classification using machine learning algorithms, which significantly enhances the effectiveness of marketing strategies and decision-making. **Object of the research:** customer classification processes in information systems using machine learning methods. **Purpose of the article:** to design, implement, and investigate the architecture of software components of an information system for intelligent customer classification, taking into account requirements for scalability, performance, and classification accuracy. **Research results.** The article proposes an architectural model of an information system that includes modules for data collection, preprocessing, and customer classification. Several software components were implemented, integrating machine learning algorithms such as logistic regression, decision trees, and support vector machines. Experimental studies based on a real-world dataset demonstrated high classification accuracy and the system's efficiency under limited computational resources. **Conclusions.** The developed information system ensures accurate customer classification and can be applied in commercial data analytics platforms. The research findings can be used to further improve intelligent software systems for data analysis.

**Keywords:** information system; customer classification; machine learning; software architecture; logistic regression; decision trees; experimental research.

Serhii Pyrozhenko, Viacheslav Radchenko

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

## METHODS AND ALGORITHMS FOR VIRTUAL MACHINE MIGRATION

**Abstract.** The article discusses various aspects of virtual machine migration. The process of moving them between different hosts, data storages, or even between cloud environments. It can be performed in two modes: cold migration, when the virtual machine is previously turned off, and live (dynamic) migration, which occurs without stopping its operation. Thanks to live migration, it is possible to transfer active virtual machines, for example, between servers within a cluster, without interrupting the provision of services. To organize such a process, special administration tools are used, in particular Hyper-V Manager or System Center Virtual Machine Manager from Microsoft Learn.

**Keywords:** cold migration, virtual machine, host, data storage, cloud environment, dynamic migration.

### Introduction

In the context of the rapid development of information technologies and the growth of computing workloads, virtualization technologies are gaining special importance, which ensure the rational use of hardware resources and increase the flexibility of infrastructure management [1, 2]. One of the key mechanisms of virtualization environments is the migration of virtual machines (VM), which is the process of moving VM between different physical hosts, data storage systems or cloud platforms in order to ensure the continuity of computing processes, load balancing and increase the fault tolerance of systems [3]. In the scientific and technical literature, two main approaches to migration are distinguished: cold, which involves stopping the operation of the virtual machine before transferring, and live (dynamic), which allows moving without interrupting service [4, 5]. The latter approach is of particular relevance in the context of critical services, where even minor delays can lead to significant losses.

The choice of optimal migration methods and algorithms is determined by the need to minimize transfer time, reduce latency, preserve data integrity, and ensure high performance of the computing environment [6, 7]. That is why conducting a systematic analysis of existing solutions in this area is an urgent scientific and practical task aimed at improving approaches to building and operating modern virtualized and cloud infrastructures.

### Main part

The concept of cloud computing is a type of distributed data processing and storage aimed at promptly providing consumers with secure, high-quality, scalable and automatically configured IT services on demand based on the pay-as-you-go model [8]. The National Institute of Standards and Technology (NIST) defines cloud computing as a combination of three service models: SaaS (Software as a Service) - software as a service; PaaS (Platform as a Service) - platform as a service; IaaS (Infrastructure as a Service) - infrastructure as a service [9, 10]. The implementation of these types of models is carried out within the framework of the data center, which is owned or leased by the service provider. Currently, as part of improving

the processes of organizing and functioning of the data center, the technology of their virtualization is used as the main technology for managing its computing and communication resources [11]. This type of data center is called virtualized or software-defined data center (SDDC) [12]. SDDC is a software add-on within a physical data center, which is a set of virtualized VRCs, such as servers, data storage systems (DSS), network components (telecommunication infrastructure), as well as a management system for them, which are deployed and managed as a single unit. The VCDC has the same functionality as a physical data center, while having additional benefits provided by virtualization technology. In fact, the VCDC, using virtualization technology, forms an abstract representation of the physical data center. In this case, the entire infrastructure of the physical data center, namely: processors (processor cores), RAM, data storage systems, network equipment, automation and information security tools are represented in the VCDC as a set (pool) of VRCs. In general, the concept of a virtual data center is formed on the basis of a generalized approach to virtualization of computing resources and already well-formed concepts of software-defined networks (SDN) and software-defined data storage systems (SDS). As in the case of SDN and SDS, such an approach allows us to present a virtualized data center in the form of IT as a Service (ITaaS) platforms.

Fig. 1 discusses the detection of underloaded or overloaded physical machines (PM) (steps 5 and 6) where one or a subset of VM must migrate between PM.

One of the goals of this migration is the need to eliminate SLA violations. The types of migration are presented in a generalized form in Fig. 2.

It is obvious that, regardless of the type of migration, this process boils down to the transfer of the state of virtualized computing and communication resources of the VM between the original and target PM. The state of virtualized computing and communication resources includes:

- state of the processor or processor cores (VCPU State);
- content of the operational memory (Memory content);
- the contents of storage of virtual disks (Storage content).

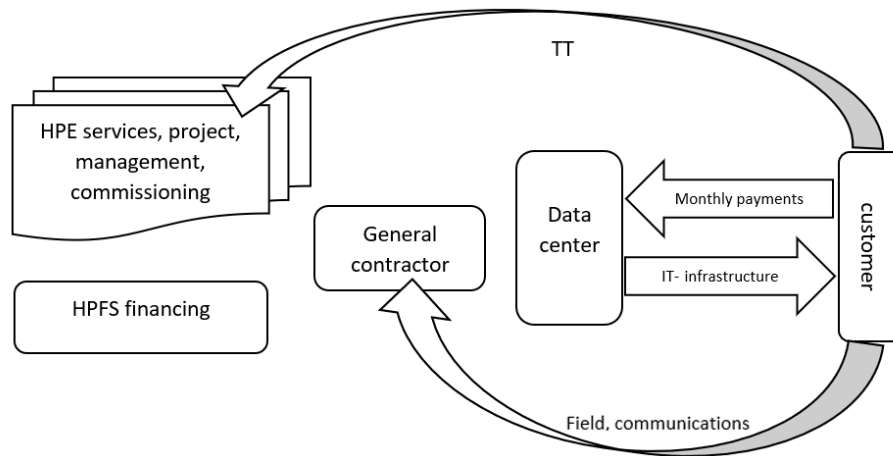


Fig. 1. Generalized representation of a virtualized data center as a FaaS service

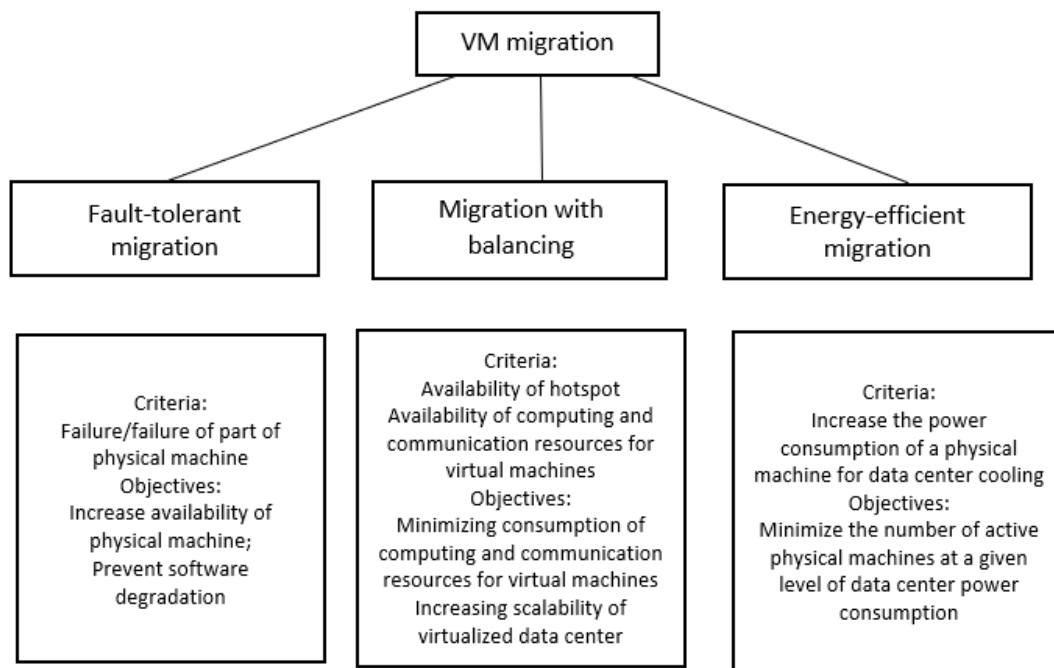


Fig. 2. Types of VM migration, their criteria and purpose

It is obvious that, regardless of the type of migration, this process boils down to the transfer of the state of virtualized computing and communication resources of the VM between the original and target PM. The state of virtualized computing and communication resources includes: state of the processor or processor cores (VCPU State); content of the operational memory (Memory content); the contents of storage of virtual disks (Storage content).

Modern data centers support a single storage of virtual disks, accessible through the telecommunications system of the data center in read-write mode for the whole set of VMs located on different PMs. The state VCPU State actually determines the context of the registers of the processor (processor core), which is not critical from the point of view of transfer between the source and target CPU. The most critical from the point of view of the operational efficiency of the VM relocation process is the content of the pages (pages) of its operational memory (Memory content). In general, the VM migration process is presented in Fig. 3.

As part of the process of VM migration presented in Fig. 3, it is classified into:

- non-live migration (VM Non-Live Migration);
- live (or dynamic) migration (VM Live Migration).

Non-live migration is performed offline. This means that VMs must be suspended on the source VM and the state of their virtualized computing and communication resources must be copied to the target VM, after which the VMs can be resumed. To transfer the state of Memory Content, non-live migration uses the stop-and-copy method, in which the execution of the VM must be suspended in order to copy its pages of the virtualized RAM to the target PM (stage 1 in Figure 3), and the VM can be resumed only after performing this copy operation. VM Live Migration refers to the transfer of the state of its virtualized computing and communication resources between the hardware computing and communication resources of a set of VMs located either within one data center node or on territorially distributed data center nodes.

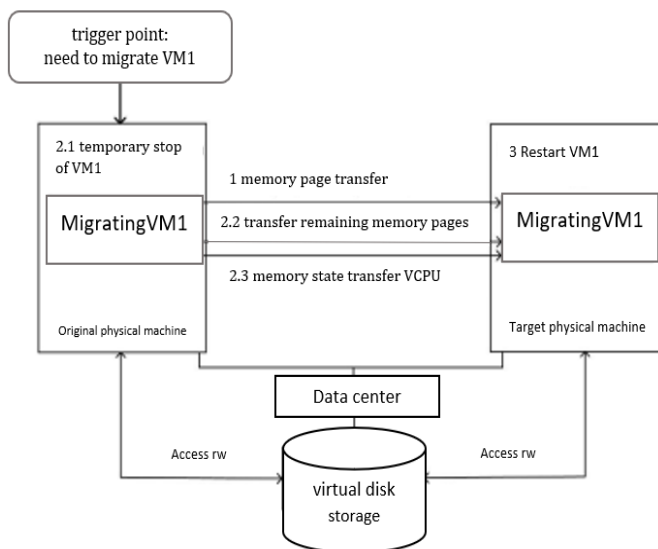


Fig. 3. General representation of the VM migration process

Existing VM Live Migration technologies mainly differ in the features of the transfer of the Memory Content state, which are based on the concept of memory organization of modern operating systems (OS) of server platforms that support the software and hardware technology of page memory allocation (Page Memory). According to this concept, the Memory content resource is represented by two sets of memory pages: Many free  $F$  pages (from Free); many busy ("dirty") pages  $D$  (from Dirty).

A busy ("dirty") memory page is a page in which a part of the  $C$  software context, the software being executed, or its individual modules is written: software code (modules); the code of the libraries necessary for the functioning of the software code; software configuration data (modules, libraries); data processed by software (modules, libraries).

It is obvious that the power of the set  $D$  is a variable value, the value of which depends on: the current value of the power of the set  $F$  at the moment of loading the software (modules, libraries) into the PM memory; values of the  $C$  software context at the time of loading the software (modules, libraries) into memory; values of the dynamically loaded context  $t_n$  of software  $C$  at moments of time  $t_n$ . In a generalized form, the principle of VM live migration is presented in Fig. 4.

It can be seen from Fig. 4 that two types of VMs are used in the process of implementing VM Live Migration:

1. Migratable (initial) VM, the state of which requires transfer (migration).

2. The target VM is located on the target VM, which, when started, will implement the functions of the migrated VM.

It is obvious that the state of the target VM at the time of startup should not be active (sleeping). Otherwise, the VM hypervisor will not get access to the set  $F$  ee memory pages. In turn, the state of the migrated VM must be active (running), since the current context of the  $C$  software running on it must be transferred during the Live Migration process, both at the start of the VM Live Migration process and during its development.

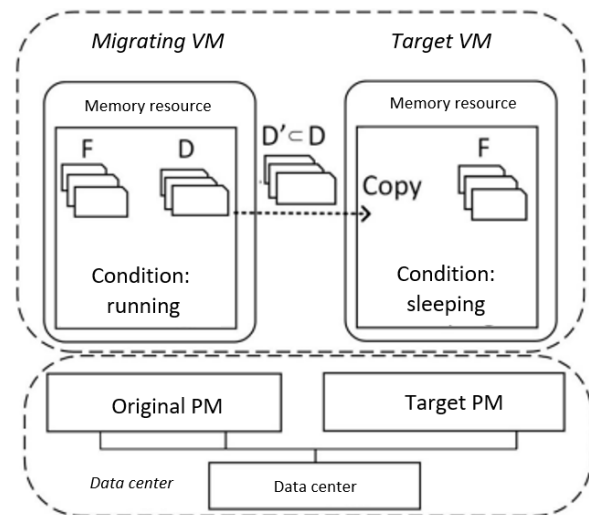


Fig. 4. General presentation of the technology of VM live migration

The basic operation of VM Live Migration is the copying (Copy) of a set of pages  $D$ . At the same time, the VM hypervisor, having determined the target VM, iteratively selects a subset of pages  $D' \subset D$  of the memory resource of the migrated VM, available for performing the Copy operation, at each moment of the VM Live Migration process. The elements of the subset  $D'$  include pages that, at the time of their selection, are not accessed for the execution of the write operation (Write) by the software (modules, libraries) operating on the migrated VM. It is obvious that the duration of the VM Live Migration process depends significantly on the activity of the software functioning (modules, libraries) specified above and can take a significant amount of time and can lead to an increase in the target quality indicator of the service provided to the user (software response time).

For example, studies of VM Live Migration of specific application services [6] showed that VM downtime varies depending on the implemented software workload template (software workload) from 60 milliseconds (gaming software) to up to 3 seconds in the case of high-performance computing software. Numerous studies have shown that the response time of software running on migrated VMs increases significantly during the entire Live Migration period. As part of the optimization of the VM Live Migration process in terms of the response time of the software, algorithms for its implementation were developed, using various approaches to the implementation of the Copy operation. Currently, there are implementations of VM Live Migration based on two approaches:

1. Pre-copy – based on a two-stage scheme that implements a preliminary iterative sending of the contents of the VM RAM pages to the source VM (stage 1), and its stopping, and copying the state of its other resources (processor and disk storage) to the target VM (stage 2);

2. Post-copy – based on the preliminary transfer of the minimum VM state (CPU state, state of registers and input/output subsystem) and subsequent iterative transfer of memory pages on demand (paging on

demand). Depending on the implementation, modern hypervisors of the first type support various of the VM Live Migration technologies considered above or their hybrid solutions.

A summary of the features of the functioning of various implementations of the pre-copy and post-copy Live Migration algorithms is presented in Fig. 5 and 6.

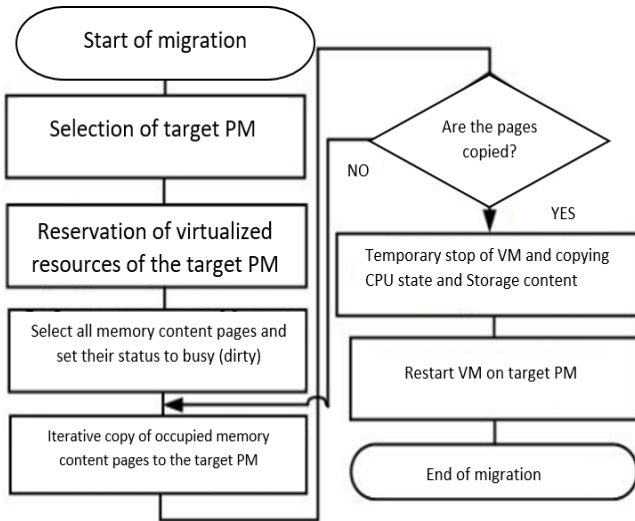


Fig. 5. Scheme of the VM Live Migration pre-copy algorithm

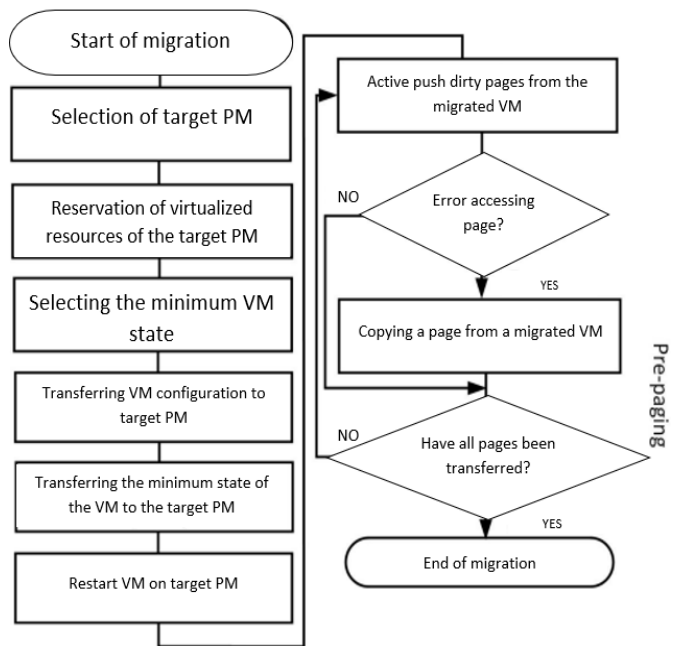


Fig. 6. Scheme of the post-copy VM Live Migration algorithm

Fig. 7 summarizes the time diagrams of the specified migration algorithms, reflecting the ratio of idle time to the total migration time.

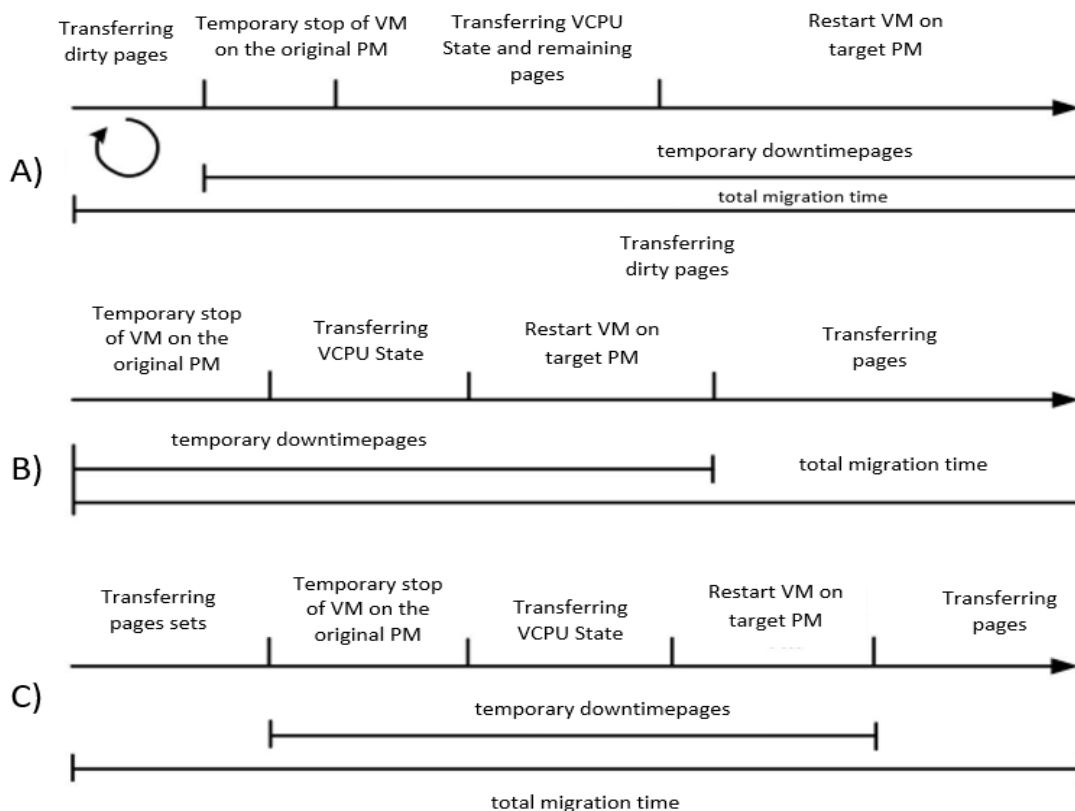


Fig. 7. Generalized timing diagrams of Live Migration algorithms: a) pre-copy, b) post-copy, c) hybrid Live Migration

In Table 1, a brief study of the features of the implementation of the specified algorithms is performed from the point of view of idle time, which leads to an increase in the response time performed on VM software. In particular, basic metrics reflecting the effectiveness of the Live Migration process

implemented by pre- and post-copy algorithms are defined (Table 1).

Figure 8 shows the time diagrams of the implementation of the pre- (a) and post-copy (c) algorithms, showing the interrelationship of the metrics presented in Table 1.

Table 1 – Metrics for evaluating the effectiveness of the live migration process of virtual machines

The name of the metric	Description of the metric
t1 - preparation time	The time between the start of the migration and the transfer of the CPU (processor) context of the VM to the target VM, during which the migrated VM continues to execute and form new pages of set D. For the pre-copy algorithm, it includes an iterative procedure of copying the entire set of pages D. For the postcopy algorithm, this time is insignificant.
t2 - downtime	Time during which execution of the migrated VM is suspended. First of all, it includes the CPU context transfer time. For the pre-copy algorithm, this transfer time includes the transfer of the last subset of pages $D' \subset D$ . For the post-copy algorithm, the time required by the VM to start on the target PM t3 - the time of resume
t3 - renewal time	The time between the resumption of VM execution on the target PM and the end of the migration as a whole. For the pre-copy algorithm, it consists of replanning the target VM and deleting the migrated VM. For the post-copy algorithm, it implements the main stages of migration (Figure 8)
Npage - the number of copied pages	The total number of copied pages of the set D, including their duplicates, according to the metrics t <sub>1</sub> , t <sub>2</sub> , t <sub>3</sub> . The pre-copy algorithm copies most of the pages for t <sub>1</sub> . The postcopy algorithm copies most of the pages for t <sub>3</sub> .

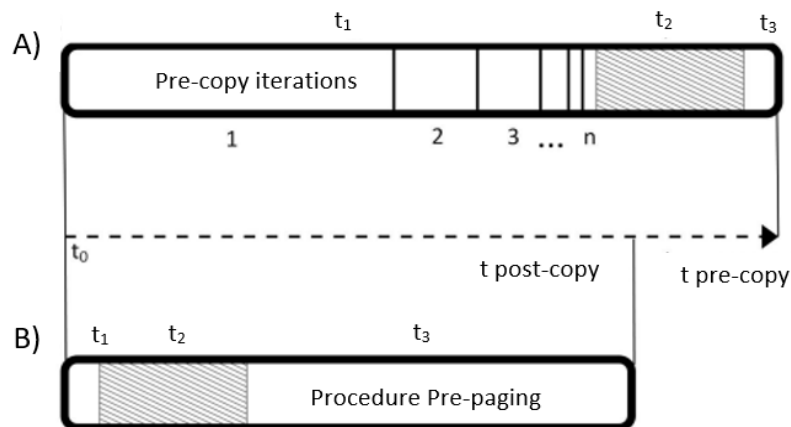


Fig. 8. Time diagrams of the implementation of live migration algorithms: a) pre-copy, b) post-copy

When performing Live Migration algorithms, Xen VMM, KVM Hypervisor, Microsoft Hyper-V, ESXi hypervisors are connected. As part of the process of functioning of the data center, the implementation of the VM Live Migration process (regardless of the algorithm of its implementation) is performed for a certain subset of VMs on the basis of a previously formed reassignment plan (VM-PM Remapping). Usually, it is presented in the form of a migration matrix (MM) - a bit map that determines the mapping of the *n*th VM to the *k*th PM.

Figures 4–8 show that, depending on the Live Migration algorithm used, the time characteristics of this process, as well as the characteristics of computing and communication resources involved in its implementation, differ significantly. They determine the overheads that are part of the data center administration process and can influence the overall efficiency of the data center operation.

It is obvious that the dynamics of the functioning of VMs in large virtualized data centers, which are generally random in nature, in combination with the automatic solution of the VM hypervisor to the task of balancing the load on multiple VMs using the VM Live Migration algorithms discussed above, over time can

lead to the fragmentation of a set of VMs by a set of distributed VCRs of VMs. Usually, such a fragmentation problem arises during the operation of the formed structure of virtualized computing and communication resources, depending on the intensity and specifics of the tasks solved by the users of these VMs.

Thus, it is important to consider methods that support the VM relocation process, taking into account the influence of Live Migration algorithms on this process.

### Conclusion

The analysis shows that virtual machine migration is a key mechanism of modern virtualized and cloud environments, which ensures the continuity of service provision, optimal use of computing resources and increased fault tolerance of the infrastructure. The main approaches to its implementation are cold and live migration, with the latter gaining the most popularity due to its ability to provide minimal downtime and high availability of critical applications.

Research into modern methods and algorithms has shown that the efficiency of the migration process depends on optimizing transfer time, reducing network

costs, preserving data integrity and maintaining quality of service (QoS).

The development of new approaches in this area is focused on the use of intelligent control algorithms, load forecasting technologies and integration with cloud and edge computing infrastructure.

Thus, further scientific research should be aimed at improving existing algorithms and developing new migration methods, which will increase the scalability and reliability of virtualized systems, as well as ensure their effective integration into the architectures of next-generation computing networks.

#### REFERENCES

1. Silva, D., Rafael, J. & Fonte, A., 2023. Virtualization Maturity in Creating System VM: An Updated Performance Evaluation. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Research*, 3(2), pp. 7–17. <https://doi.org/10.53375/ijecer.2023.341>
2. Zhang, S., Wang, Y., Wan, X., Li, Z. & Guo, Y., 2023. Virtualization Airborne Trusted General Computing Technology. *Applied Sciences*, 13(3), 1342. <https://doi.org/10.3390/app13031342>
3. Altahat, M.A., Daradkeh, T. & Agarwal, A., 2025. Virtual machine scheduling and migration management across multi-cloud data centers: blockchain-based versus centralized frameworks. *Journal of Cloud Computing*, 14, Article number: 1. <https://doi.org/10.1186/s13677-024-00724-7>
4. Kuchuk, N., Mozhaiev, O., Semenov, S., Haichenko, A., Kuchuk, H., Tiulieniev, S., Mozhaiev, M., Brusakova, O. and Gnusov, Y. (2023), “Devising a method for balancing the load on a territorially distributed foggy environment”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(4 (121), pp. 48–55. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.274177>.
5. Chen, J., Wang, Y. and Liu, T. (2021), “A proactive resource allocation method based on adaptive prediction of resource requests in cloud computing”, *J. Wireless Com Network*, 24, doi: <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01912-8>.
6. Petrovska, I. and Kuchuk, H. (2022), “Static allocation method in a cloud environment with a service model IAAS”, *Advanced Information Systems*, vol. 6, is. 3, pp. 99–106. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.3.13>.
7. Kuchuk, N., Shefer, O., Cherneva, G. and Alnaeri, F.A. (2021), “Determining the capacity of the self-healing network segment”, *Advanced Information Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 114–119, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.16>.
8. Petrovska, I. and Kuchuk H. (2022), “Features of the distribution of computing resources in cloud systems”, *Control, Navigation and Communication Systems*, No. 2, pp. 75-78, doi: <http://dx.doi.org/10.26906/SUNZ.2022.2.075>.
9. Kuchuk, G., Kovalenko, A., Komari, I.E., Svyrydov, A. and Kharchenko, V. (2019), “Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method”, *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 171, Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kacprzyk, J. (Eds.), Springer Nature Switzerland AG, pp. 161-183, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8).
10. Nechausov, A., Mamusuć, I. and Kuchuk, N. (2017), “Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyperconvergent infrastructures”, *Advanced Information Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 21–26, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.04>.
11. Tan, B., Ma, H. and Mei, Y. (2017), “A NSGA-II-based approach for service resource allocation in cloud”, *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, 17013723, pp. 2574–2581, doi: <https://doi.org/10.1109/CEC.2017.7969618>.
12. Wang, J., Bewong, M. & Zheng, L. (2024), “SD-WAN: Hybrid Edge Cloud Network between Multi-site SDDC”, *Computer Networks*, 250, Article number 110509, doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110509>

Received (Надійшла) 16.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.07.2025

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Пироженко Сергій Станіславович** – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Serhii Pyrozhenko** – PhD candidate of Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [serhii.pyrozhenko@nure.ua](mailto:serhii.pyrozhenko@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0006-4209-2144>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59675302400&origin=resultlist>.

**Радченко В'ячеслав Олексійович** – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Viacheslav Radchenko** – PhD candidate of Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [Viacheslav.Radchenko@nure.ua](mailto:Viacheslav.Radchenko@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0001-5782-1932>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57189376280&origin=resultlist>.

#### Методи та алгоритми міграції віртуальних машин

С. С. Пироженко, В. О. Радченко

**Анотація.** У статті розглянуто різні аспекти міграції віртуальних машин, процес їх переміщення між різними хостами, сховищами даних або навіть між хмарними середовищами. Вона може здійснюватися у двох режимах: холодна міграція, коли віртуальна машина попередньо вимикається, та жива (динамічна) міграція, яка відбувається без зупинки її роботи. Завдяки живій міграції можливо переносити активні віртуальні машини, наприклад, між серверами всередині кластера, не перериваючи надання послуг. Для організації такого процесу застосовують спеціальні інструменти адміністрування, зокрема Hyper-V Manager або System Center Virtual Machine Manager від Microsoft Learn.

**Ключові слова:** холодна міграція, віртуальна машина, хост, сховище даних, хмарне середовище, динамічна міграція.

Yuliia Andrusenko<sup>1</sup>, Serhii Datsenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

## FEATURES OF PLANNING MOVABLE CLOUD VOIP SERVICE

**Abstract.** The article discusses approaches to planning a non-stationary cloud VoIP service, which is characterized by dynamic load variations and increased quality of service requirements. Key parameters of effective service operation are analyzed, including traffic forecasting, adaptive allocation of computing resources, infrastructure scalability, load balancing, and fault tolerance. It is shown that the use of cloud technologies ensures flexibility and high availability of VoIP services, while also reducing infrastructure costs. Special attention is paid to challenges related to minimizing network latency and maintaining stable voice call quality. The obtained results can be applied to optimize the processes of designing and managing cloud-based telecommunication systems.

**Keywords:** VoIP service, cloud, computer system, infrastructure cost, scalability, traffic.

### Introduction

The current stage of information technology development is characterized by the widespread use of cloud computing and services that provide scalability, flexibility and high availability of computing resources. One of the most popular areas of application of cloud platforms is the implementation of voice communication systems over the Internet (VoIP), which allows to significantly reduce the costs of telecommunications infrastructure and ensure integration with other digital services [1, 2]. However, unlike stationary solutions, cloud VoIP services have a dynamic nature of the load, which varies depending on the number of users, time of day and external conditions. This necessitates the development of effective planning methods that can take into account the non-stationary nature of traffic and the peculiarities of the cloud infrastructure. Important tasks in this regard are ensuring quality of service (QoS), optimal use of resources and minimizing delays in voice data transmission [3, 4].

Thus, the relevance of the research lies in creating approaches to planning a non-stationary cloud VoIP service that will increase the efficiency of using computing and network resources, as well as ensure high quality communication under variable load conditions.

### Main part

Large and small corporations are implementing VoIP technology in their companies to reduce operational costs at the infrastructure level.

It has a simpler connection and requires less hardware. In addition, VoIP is considered a long-term perspective for service development, offering greater flexibility and more capabilities than the traditional telephone network – Public Switched Telephone Network – PSTN. It is able to cope with various workloads, dynamically adapting resources depending on demand. Service provision scheduling depends not only on the properties of the infrastructure handling calls and video conferences, as well as transmitting data, etc., but also on other users sharing the resources.

This problem is complicated by the unpredictable impact of time delays when starting VMs, changing call processing speeds depending on the codecs used, and uncertain call times. Traditional solutions do not adequately account for such uncertainty, infrastructure heterogeneity, and dynamic performance changes inherent in scalable VoIP services.

To better understand the implications of such non-stationarity, this chapter examines the properties of VoIP scheduling proposed in Table 1.

Table 1 – Key Parameters of Planning a Non-Stationary Cloud VoIP Service

Parameter	Description	Impact on Service Quality
Traffic Forecasting	Consideration of peak and minimum values of VoIP traffic	Helps avoid overload and packet loss
Resource Allocation	Dynamic distribution of virtual machines, CPU, and memory	Ensures stability and performance
Infrastructure Scalability	Horizontal and vertical scaling in the cloud environment	Increases flexibility and availability
Load Balancing	Distribution of VoIP sessions across different nodes	Reduces delays and probability of failures
Reliability and Fault Tolerance	Use of redundancy and recovery mechanisms	Maintains service continuity
Infrastructure Costs	Optimization of resource usage and cloud services	Reduces financial expenses

Asterisk powers IP Pate Bank Exchange PBX systems in CVoIP solutions. Asterisk runs in VMs to provide calls, voice mail, video/audio conferencing,

interactive phone menus, call distribution, etc. In addition to transmitting images and text, users can create new functionalities, opening up a completely new telephony

experience. The success of CVoIP largely depends on QoS and price. QoS is the first aspect to be considered in the model because it has more stringent constraints and sensitivities. Call delivery and processing determine QoS in CVoIP. The most important aspect of call delivery is adequate voice transmission over IP network. It depends on the time it takes for packets to travel across the Internet, delays in router queues, time it takes for packets to travel from source to destination, packet delay variations (jitter), packet loss, etc. Adequate voice quality is the most important aspect of call processing. It takes into account the time it takes to set up and tear down a call, as well as to convert the voice portion of the call into packets transmitted over the network.

Voice quality is subjectively perceived by the listener. A common criterion used to determine voice quality is the Mean Opinion Score (MOS). It evaluates the speech quality provided by a codec. Each codec provides a certain speech quality only at a sufficiently low processor load. Theoretically, 100% processor load provides the best expected performance. However, at loads of up to 85%, the processor cannot cope with the load, and jittering and breaks in sound appear [5]. Moreover, additional elements inherent to cloud environments may affect call QoS, such as the deployment time of the virtual infrastructure of the CVoIP system, encryption of VoIP traffic, etc. All these factors must be studied in order to minimize their impact on voice quality and ensure correct call processing. Cost is

the second aspect that must be taken into account for the success of the CVoIP model. CVoIP providers must optimize the rental and use of resources in order to offer competitive prices to potential customers. Moreover, inefficient resource management has a direct negative impact on performance and cost. Rental of VMs in the cloud is used as a parameter for assessing the cost of the CVoIP service. It allows providers to measure the cost of the system in terms of resource demand and the time of their use. CVoIP providers can offer the user economical and adequate services if: 1) the rental of resources for providing the service is as low as possible; 2) the use of resources is low enough to guarantee voice quality, and therefore the quality of the service. Both goals are in conflict. The provider should maximize the resource utilization to reduce the infrastructure cost, but this worsens the QoS. On the other hand, reducing the resource utilization guarantees the QoS, but increases the infrastructure rental cost. VoIP providers use load balancing techniques to achieve high QoS and reduce costs. Unfortunately, the existing techniques are ineffective in large-scale systems such as cloud computing. In recent years, various algorithms have been presented to overcome the problems of CVoIP. However, call distribution in CVoIP considering QoS and provider cost optimization is still poorly understood. This chapter formulates the problem of scheduling VoIP services in cloud computing.

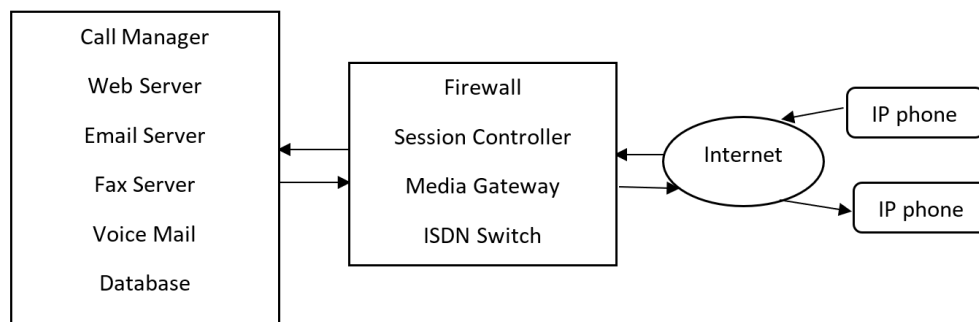


Fig. 1. VoIP architecture

The disadvantage of this architecture appears when the hardware reaches its maximum capacity. Traditional VoIP solutions are difficult to scale. Call Manager, Web Server, Email Server, Fax Server, Voice Mail, Database, Firewall, Session Controller, Media Gateway, Switch, ISDN, Internet, IP Phone, IP Phone expand, so to scale the system it is necessary to increase the infrastructure or replace the existing equipment. Redundant equipment and its associated costs are not an effective solution, even taking into account the growing number of customers and the potential security associated with the ability to provide service during peak hours or abnormal system behavior. Moreover, VoIP requires constant availability for any number of users. Providers can invest in a large infrastructure to avoid call loss and therefore users cope with the growing number of customers. In this case, the infrastructure is usually underutilized. Moreover, servers need to be replaced due to resource degradation. MXOp [6, 7] developed the concepts of a voice super node (Super Node – SN) and a super node cluster (Super Node C, abbr. – SNC) to enrich the functions of telephone exchanges. An SNC is a set of SNs deployed in the cloud

and logically interconnected at the local level. SNCs allow minimizing the path between two local users and improving the voice quality. Such deployment provides redundancy in a given geographic area and guarantees high quality of voice transmission between SNCs over the public Internet. SNCs are deployed in widely distributed geographic locations. The constituent elements of the SN layer are shown in Fig. 2.

The main components of the layers are: the operating system OS, the security system, the monitoring system and the voice node. The OS runs the VoIP Asterisk software. LINUX distributions are used as the main option, but other OS can also be used. The security level determines access to the server, for example, a user can access the phone through his login and password, using SSH and FTP sessions. Monitoring checks resource usage and reports problems with voice nodes. Voice Node (VN) contains the functions of the telephone system: voice mail, call transfer, music on hold, conference function, etc. This distributed architecture distributes computations across several nodes, reduces the risk of failures and limits the cost of purchasing equipment.

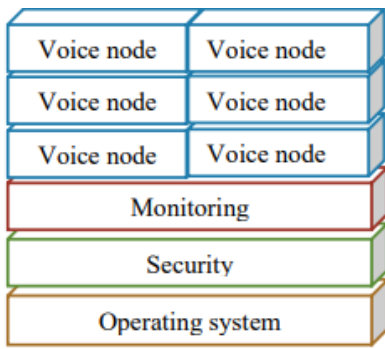


Fig. 2. Super Node Voice Architecture

MIX uses the concept of SNs and SNCs to increase capacity and provision services. In this model, SNs are deployed by multiple cloud providers using the IaaS model. Hybrid VoIP HVoIP model is an improvement on the traditional SNs-based VoIP model. HVoIP uses the traditional VoIP infrastructure and VMs to deploy VoIP services when the installed servers reach their maximum capacity. HVoIP provides several advantages over traditional VoIP: it improves system scalability and reduces over-provisioning, granularity, and cost. Unfortunately, HVoIP also has disadvantages: It is an

expensive model because providers still need to lease offices and facilities and maintain the resources to provide the service. In addition, it can lead to an increase in unused resources; the provider must use its own resources as much as possible. Operating system Security Monitoring Voice node Voice node Voice node Voice node Voice node Voice node Voice node use less rented resources. A fully cloud-based model is a possible improvement of HVoIP. In cloud VoIP CVoIP, the infrastructure is rented in local clouds. This allows VoIP providers to reduce infrastructure costs and idle resources. In addition, CVoIP allows for increased redundancy over a geographical area and provides high-quality voice transmission between SNs. Similar to HVoIP, SNs run in VMs in some cloud environment. In addition, CVoIP adds new features and capabilities, provides simpler implementation, and integrates dynamically scalable services. Other advantages include availability, integrity, and security of data transmission. Figure 3 shows a cloud solution to this problem. Voice nodes provide various services such as call transfer, voice mail, conference function, music on hold, etc. The advantage of this architecture is increased scalability, since VMs can be distributed across multiple processors.

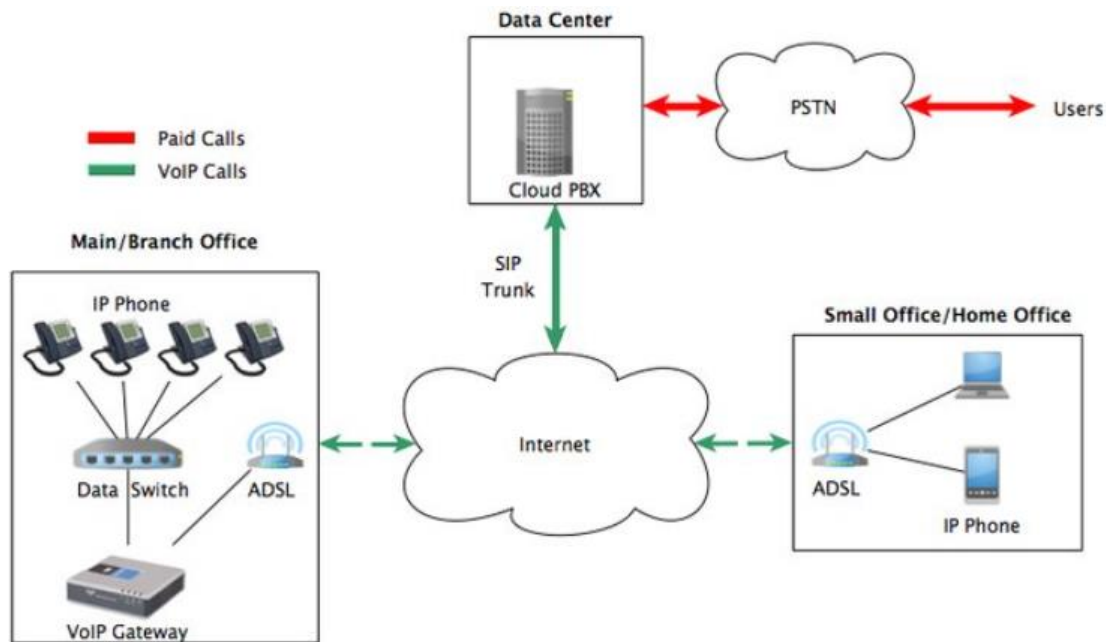


Fig. 3. VoIP cloud architecture

The following advantages of supernodes in CVoIP can be distinguished:

**Granularity.** Supernodes reduce conflicts between user workstations and the central infrastructure when updating the Internet IP phone IP phone Internet O.S. Security Monitoring Voice node Voice node DB Central performance data center. They have full compatibility between phone manufacturers and telephone exchanges and manage several versions of phone software. **Scalability** In case of saturation, the infrastructure can increase the number of nodes without changing the existing architecture or affecting customer service.

**Spreadability.** Supernodes can be deployed in other geographical areas, while providers do not need to

physically install servers and equipment, they just need to rent infrastructure in local clouds.

**Resilience** The distribution of nodes makes it possible to achieve greater fault tolerance. CVoIP can detect failed nodes and automatically redirect traffic to healthy instances until the failed instances are restored.

**Cost reduction.** The use of cloud systems reduces the cost of infrastructure and investment in equipment. Providers pay only for used resources. In the CVoIP system, the distributed architecture assumes that VNs are distributed geographically, therefore, they are grouped in different locations in data centers. For the deployment and effective management of telephones through the cloud, it is necessary to improve various characteristics of the

system, the most important of which is the use of infrastructure. To optimize the overall performance of the system, it is necessary to balance the workload of the voice signal processing processor over IP. Overloading the processor reduces the quality of the voice in the call. A similar problem may arise with network bandwidth. In addition, the idle time of the processor increases the useless expenses of the provider. Call distribution maximizes CVoIP performance by reducing the number of active resources and keeping their idle time to a minimum. To minimize quality degradation, all resources must contain the same amount of computational work without exceeding the threshold guaranteeing QoS. Thus, the advantages of CVoIP technology will be used only when using effective planning methods.

### Conclusion

The article considered the features of planning a non-stationary cloud VoIP service, which is

characterized by dynamic load changes and high requirements for quality of service. The analysis showed that the key aspects of the effective functioning of such a system are adaptive allocation of computing resources, traffic forecasting and timely scalability of the infrastructure.

The use of cloud technologies allows to ensure flexibility and resilience of the service to peak loads, reduce infrastructure maintenance costs and increase the level of availability. At the same time, to achieve stable operation, it is necessary to take into account the risks associated with network delays, load balancing and system fault tolerance. Thus, effective planning of a non-stationary VoIP service in a cloud environment is a complex task that combines technical, organizational and economic approaches. Further research in this direction can be focused on the application of artificial intelligence and machine learning methods to optimize forecasting processes and dynamic resource management.

### REFERENCES

1. Adjardjah, W., Kumassah, F., Abdallah, D. M. & Addor, J., 2023. "Performance Evaluation of VoIP Analysis and Simulation". *Journal of Engineering Research and Reports*, 25(7), pp.176-191. DOI: <https://doi.org/10.9734/jerr/2023/v25i7951>
2. Petrovska, I. and Kuchuk, H. (2022), "Static allocation method in a cloud environment with a service model IAAS", *Advanced Information Systems*, vol. 6, is. 3, pp. 99–106, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.3.13>
3. Singh, A., 2022. "Enhancing VoIP Quality in the Era of 5G and SD-WAN". *Journal of Artificial Intelligence & Cloud Computing*, 1(2), pp.1-6. DOI: [https://doi.org/10.47363/JAICC/2022\(1\)E253](https://doi.org/10.47363/JAICC/2022(1)E253)
4. Kuchuk, N., Shefer, O., Cherneva, G. and Alnaeri, F.A. (2021), "Determining the capacity of the self-healing network segment", *Advanced Information Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 114–119, Jun. 2021, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.16>
5. Jaish, A. A. & Al-Shammari, B. K. J., 2023. "Quality of Experience for Voice over Internet Protocol (VoIP)". *Wasit Journal of Engineering Sciences*, 11(3), pp.96-105. DOI: <https://doi.org/10.31185/ejuow.Vol11.Iss3.460>
6. Kuchuk, N., Mozhaiev, O., Semenov, S., Haichenko, A., Kuchuk, H., Tiulieniev, S., Mozhaiev, M., Davydov, V., Brusakova, O. and Gnusov, Y. (2023), "Devising a method for balancing the load on a territorially distributed foggy environment", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(4 (121)), pp. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.274177>
7. Kumar, V. & Roy, O. P., 2021. "A survey on voice over internet protocol (VoIP) reliability research". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1020(1). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1020/1/012015>

Received (Надійшла) 16.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.08.2025

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Андрусенко Юлія Олександрівна** – асистент кафедри Електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Yuliia Andrusenko** – Assistant Professor of Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [yuliia.andrusenko@nure.ua](mailto:yuliia.andrusenko@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-7844-2042>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59412400500&origin=resultslist>.

**Даценко Сергій Сергійович** – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

**Serhii Datsenko** – PhD candidate of Department of Electronic Computers, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [Serhii.Datsenko@gmail.com](mailto:Serhii.Datsenko@gmail.com); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0004-4372-1913>.

### Особливості планування нестационарного хмарного VOIP сервісу

Ю. О. Андрусенко, С. С. Даценко

**Анотація.** У статті розглянуто підходи до планування нестационарного хмарного VoIP сервісу, що характеризується динамічними змінами навантаження та підвищеними вимогами до якості обслуговування. Проаналізовано ключові параметри ефективного функціонування сервісу, серед яких прогнозування трафіку, адаптивний розподіл обчислювальних ресурсів, масштабованість інфраструктури, балансування навантаження та забезпечення відмовостійкості. Показано, що використання хмарних технологій дозволяє забезпечити гнучкість і високу доступність VoIP-сервісів, а також знизити витрати на інфраструктуру. Особлива увага приділяється викликам, пов'язаним із мінімізацією мережних затримок і підтриманням стабільної якості голосових з'єднань. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації процесів проєктування та управління хмарними телекомунікаційними системами.

**Ключові слова:** VoIP сервіс, хмара, комп'ютерна система, вартість інфраструктури, масштабованість, трафік.

Н. Б. Бурдейна, Я. А. Підлісний

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

## ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ НОРМАЛІЗАЦІЇ РІВНІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ НАДНИЗЬКОЇ ЧАСТОТИ

**Анотація.** Досліджено основні підходи по нормалізації електромагнітної обстановки у будівлях і спорудах загального призначення. Визначено, що найбільш поширені резонансні системи одночасної компенсації реактивної потужності і придушення вищих гармонік та інтергармонік електричного струму (напруги) промислової частоти неефективні за наявності складного спектра гармонік та інтергармонік. Експериментально визначено, що у сучасних будівлях і спорудах з великою кількістю електроспоживачів з нелінійними вольт-амперними характеристиками спектр інтергармонік, у тому числі й субгармонік, складний і непередбачуваний. Показано, що сучасні універсальні системи придушення гармонік та інтергармонік мають високу вартість й доцільні для застосування на підприємствах з високими електроспоживаннями для заощадження енергії. Запропоновано схему придушення гармонік та інтергармонік електричного струму промислової частоти зі зворотними зв'язками з використанням трансформатора. Такий підхід доречний для непередбачуваних змін гармонічного складу напруги у системі електроживлення. Показано, що генерація інтергармонік можлива й у будівлях з відносно невеликим внеском нелінійних електроспоживачів у загальне навантаження. Інтергармоніки можуть генеруватися внаслідок модуляційних явищ у процесах падіння напруги при вмиканні потужних електроспоживачів. Надано порядок розроблення організаційно-технічних заходів електромагнітної безпеки на основі електромагнітного моніторингу. Наголошено, що на першому етапі таких робіт необхідно забезпечити рівномірність навантаження на окремі фази силової електромережі, провести повну ревізію систем компенсації реактивної потужності та ліквідацію електричних струмів витоку.

**Ключові слова:** електромагнітна безпека, гармоніки, інтергармоніки, електромагнітний моніторинг

### Вступ

У більшості будівель і споруд громадського призначення та у побутовому середовищі головним електромагнітним чинником впливу на людей є електромагнітні поля наднизької частоти, в основному промислової частоти 50 Гц. В останнє десятиріччя у будівлях будь-якого призначення збільшується кількість та щільність розташування електричного та електронного обладнання з нелінійними вольт-амперними характеристиками. У результаті його експлуатації відбувається генерація гармонік та інтергармонік електромагнітного поля промислової частоти. Амплітудні значення гармонік та інтергармонік непередбачувані та змінюються у просторі і часі, що призводить до підвищення електромагнітного фону непередбачуваним чином. Зниження рівнів таких полів традиційними засобами екранування неможливе через квазістаціонарність таких полів. Тому доцільно дослідити можливості максимального зниження рівнів електромагнітних полів наднизької частоти за рахунок розроблення і впровадження організаційно-технічних заходів з придушення генерації гармонік та інтергармонік електричного струму промислової частоти.

**Огляд літературних джерел.** Рівні електромагнітних полів промислової частоти регламентуються в Україні для виробничих умов санітарними нормами [1], а для побутових умов – нормативом [2]. Але вони не розглядають рівні гармонік та інтергармонік. Тобто, вимірювання значень електричної та магнітної складових електромагнітного поля промислової частоти дає формальні підстави робити висновок про

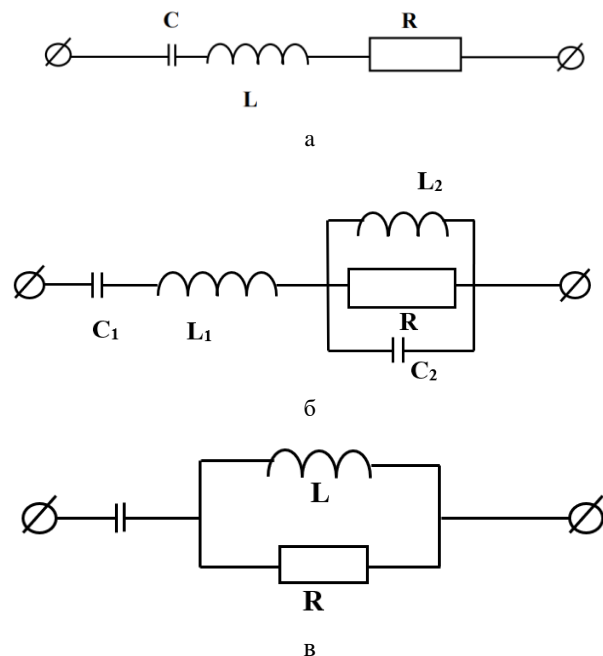
стан електромагнітної обстановки щодо полів наднизької частоти. Рівні гармонік електричного струму (напруги) промислової частоти регламентуються низкою міжнародних стандартів з електромагнітної сумісності серії 61000, наприклад [3], які набули чинності в Україні методом підтвердження у 2016 р. Більшість досліджень у цьому напрямі спрямовані на зниження втрат електроенергії й стосуються енергоємних підприємств, таких, як дугові сталеплавильні печі. Такі споживачі спотворюють синусоїдальність напруги, і крім втрат енергії негативно впливають на роботу силових трансформаторів. Ця проблематика й основні підходи до вирішення задач зниження рівнів гармонік розглянуто у фундаментальній роботі [4]. У роботах [5, 6] наголошується, що магнітні поля гармонік промислової частоти можуть мати гігієнічне значення. Але засобом зниження їх впливу на працюючих пропонується обмеження внеску нелінійних споживачів у загальне електроспоживання до 20–25 %. На поточному етапі розвитку електротехніки та електроніки це не завжди можливо. Такий підхід доцільний, коли у будівлі з трифазною системою електроживлення експлуатуються комп'ютери малої потужності. У дослідженні [7] фактично уточнюється відносний внесок у енергоспоживання нелінійних споживачів, за якого вплив магнітних полів гармонік промислової частоти можна вважати не критичним. У роботі [8] показано, що найбільш доцільним є одночасна компенсація реактивної потужності й придушення гармонік промислової частоти. Перевагою дослідження є оцінка ефективності фільтрокомпенсуючих пристроїв у залежності від характеристик електричного струму, кількості й густини гармонік та

інтергармонік). Це дослідження може бути основою для вирішення задач електромагнітної безпеки у будівлях масового використання. Як зазначалося вище, більшість розробок стосуються підприємств з великим електроспоживанням та відповідними втратами енергії. Тому застосування складних фільтрокомпенсуючих систем великої вартості виправдане у [9]. Але у більшості будівель і споруд головну увагу доцільно приділити амплітудним значенням гармонік та інтергармонік з точки зору електромагнітної безпеки. Це дозволить обрати найбільш прийнятний спосіб придушення гармонічних спотворень напруги живлення й забезпечити рівень електромагнітної безпеки на принципах розумної достатності.

**Мета роботи** – визначити перелік та вміст організаційно-технічних заходів з електромагнітної безпеки в умовах впливу електромагнітних полів наднизької частоти.

### Викладення основного матеріалу

Задачі, пов'язані зі зниженням рівнів магнітних полів частот вищих гармонік та інтергармонік промислової частоти можна вирішити за рахунок зниження електричних струмів цих частот у силовій електромережі будівлі. Фактично це задача забезпечення максимальної синусоїдальності електричного струму. Це реалізується одночасно з компенсацією реактивної потужності у мережі за рахунок застосування резонансних фільтрів. Найбільш прості системи придушення вищих гармонік та інтергармонік розглянуто у [8] та визначено їх переваги та недоліки. Схематично ці системи наведено на рис. 1.

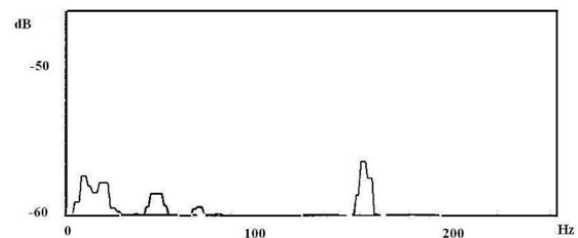


**Рис. 1.** Схеми резонансних фільтрокомпенсуючих пристроїв: а – резонансний фільтр, б – дворезонансний фільтр, в – демпферувальний фільтр

Резонансний фільтр налаштований на одну частоту й «не помічає» інші гармонічні спотворення електроживлення. Якщо гармонік декілька, то можливо застосовувати, наприклад, дворезонансний фільтр. У

разі певного спектра інтергармонік застосовуються демпферувальні фільтри. Але у реальних умовах експлуатації будівлі ці параметри можуть змінюватися у залежності від кількості нелінійних електроспоживачів, які підключені до силової мережі у даний момент. Крім того, можливі певні зміни навантаження на окремі фази трифазної силової електромережі (перекоос фаз).

За великих відносних значень електроспоживання нелінійних навантажень, більше 25 %, спектральний склад магнітного поля гармонік та інтергармонік може бути дуже складним (рис. 2).



**Рис. 2.** Спектральний склад електромагнітного поля наднизької частоти у будівлі з великою кількістю нелінійних споживачів

Рис. 2 не надає абсолютних значень напруженості магнітних полів, але свідчить, що значення третьої гармоніки та субгармонік (частот, нижчих за основну) перевищують значення магнітного поля частотою 50 Гц.

За таких умов при формальному контролі електромагнітної обстановки стандартним приладом не враховуються магнітні поля напруженостями, вищими за напруженість поля частотою 50 Гц.

Експериментальні дослідження свідчать, що такі відхилення мають системний характер. На рис. 3 наведено спектральний склад магнітного поля у приміщенні з великою кількістю комп'ютерної техніки.

Термін «комп'ютерна техніка» включає у себе друкуючі і копіювальні пристрої, джерела безперебійного живлення тощо. Тому у залежності від кількості й типів технічних засобів, які працюють одночасно, залежить й спектральний склад магнітного поля. Слід відзначити, що поля різних гармонік та інтергармонік генеруються відповідними електрострумами, які протікають нульовими робочими провідниками трифазної силової електромережі. Це добре відомо електротехнікам, але не враховується при розробленні та впровадженні заходів електромагнітної безпеки.

Наведені на рис. 3 значення магнітного поля невеликі, але гранично допустимі рівні магнітного поля у частотній смузі 5 Гц – 2 кГц складають 250 нТл, тому навіть магнітне поле частотою 50 Гц перевищує це значення,  $1 \text{ А/м} = 1,26 \text{ мкТл}$ .

Слід зазначити, що закономірності у появі інтергармонік не виявлено. У багатьох випадках субгармоніка частотою 12,5 Гц перевищує субгармоніку 25 Гц. З'являється інтергармоніка частотою 75 Гц. Але усе це свідчить про системність проблеми.

У таких умовах пристрої придушення гармонік та інтергармонік електричного струму промислової

частоти повинні бути динамічними й реагувати на фактичні зміни гармонічного складу електричного струму (напруги) у силовій мережі. Такий фільтро-

компенсуючий пристрій повинен мати зворотні зв'язки. Принципова схема такого пристрою наведена на рис. 4.

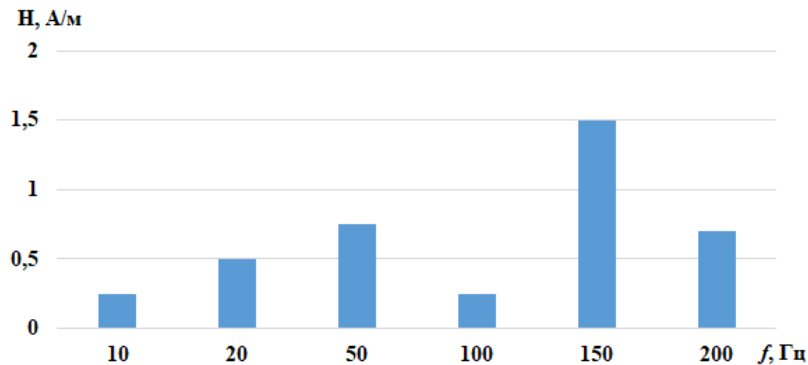


Рис. 3. Напруженості магнітного поля наднизької частоти у приміщенні з великою кількістю комп'ютерної техніки

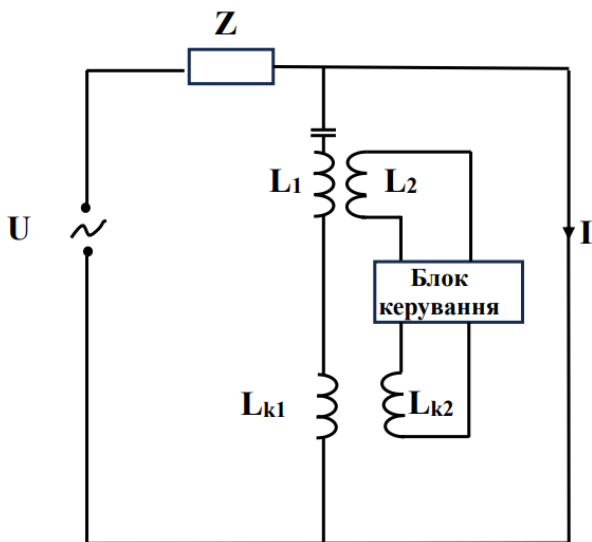


Рис. 4. Схема фільтрокомпенсуючого пристрою зі зворотними зв'язками

У практичній діяльності щодо врахування наявності вищих гармонік та інтергармонік у силовій електромережі слід врахувати, що створення синусоїдальності напруги живлення можливе й за мінімальної кількості або відсутності електроспоживачів з нелінійними вольт-амперними характеристиками [10]. Якщо у електромережі є гармонічні коливання напруги амплітудою  $\Delta U$  й циклічною частотою  $\Delta\omega$ , то миттєве значення напруги визначається співвідношенням:

$$U(f) = B_H \left( \sin t + \frac{k}{2} (\cos(\omega - \Delta\omega)t - \cos(\omega + \Delta\omega)t) \right) = B(1 + k \sin \Delta t) \sin \omega t,$$

де  $B$  – середнє значення огинаючої амплітуди напруги за один період,  $k = \Delta\omega / (\sqrt{2}B)$  – коефіцієнт модуляції.

За один період крива напруги відрізняється від синусоїди частотами  $\omega \pm \Delta\omega$ , які є інтергармоніками.

Тобто поява інтергармонік у силовій електромережі можлива у разі коливань електронавантаження у будівлі за рахунок вмикання та вимикання потужного електричного обладнання.

Процес розроблення й впровадження організаційно-технічних заходів електромагнітної безпеки у будівлях і спорудах загального призначення доцільно починати з ревізії системи електропостачання. Необхідно забезпечити максимально рівномірне навантаження на окремі фази трифазної силової електромережі. Визначити технічний стан існуючих систем компенсації реактивної потужності, зокрема блоків конденсаторів. Також необхідно визначити наявність електричних струмів витоку на нульові захисні провідники й заземлені металеві конструкції будівель. На наступному етапі виконується моніторинг електромагнітної обстановки з обов'язковим визначенням спектра магнітних полів наднизької частоти. Такі дані дозволяють розробити адекватні заходи електромагнітної безпеки з мінімальними витратами часу й коштів.

## Висновки

1. Розглянуто ефективність основних конструкцій для одночасної компенсації реактивної потужності й придушення вищих гармонік та інтергармонік електричного струму (напруги) промислової частоти. Визначено, що в умовах складного спектра напруги у електромережі вони недостатньо ефективні. Існуючі ефективні системи мають велику вартість й доцільні для використання на підприємствах з високим енергоспоживанням для знищення втрат енергії.

2. Експериментально визначено появу у системах електроживлення гармонік, інтергармонік, у тому числі й субгармонік електричного струму промислової частоти, які генерують магнітні поля гігієнічно значущих напруженостей. Запропоновано концептуальну схему пристрою придушення гармонік та інтергармонік із застосуванням зворотних зв'язків з автоматичним реагуванням на зміни напруги у силовій електромережі.

3. Показано можливість появи у силовій електричній мережі інтергармонік напруги промислової частоти внаслідок падінь і підвищень напруги за рахунок вмикання потужного електричного обладнання. Визначено порядок розроблення організаційно-технічних заходів електромагнітної безпеки.

На попередньому етапі обов'язковою є повна ревізія системи електроживлення з вирівнюванням навантаження на окремі фази трифазної силової мережі, визначенням технічного стану систем компенсації реактивної потужності та виявлення і ліквідація електричних струмів витоку.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСНІП 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів [Чинний від 2003-03-13]: затв. наказом М-ва охорони здоров'я України від 18.12.2002 р. № 476. Київ, 2003. 16 с
2. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008 Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика. Зі змінами. Київ. Науково-технічний центр електроенергетики «НЕК «Укренерго», 2016
3. IEC 61000-3-12:2011. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16 A and ≤ 75 A per phase. International Electrotechnical Commission.
4. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. Энергоатомиздат, 2010. 375 с.
5. Глива В.А. та ін. Джерела гармонік магнітного поля у будівлях і спорудах та мінімізація їх рівнів. Проблеми охорони праці в Україні. 2015. Вип. 29. С. 48–58
6. Левченко Л. А. Перелёт Т. Н., Паньків К. В. Гармоники электрических токов промышленной частоты как источники магнитных полей и методы снижения их уровней. Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2015. Вип. 1 (23). С. 14–22.
7. Glyva V., Kasatkina N., Levchenko L., Tykhenko O., Nazarenko V., Burdeina N., Panova O., Bahrii M., Nikolaiev K., Biruk Y. Determining the dynamics of electromagnetic fields, air ionization, low-frequency sound and their normalization in premises for computer equipment. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2022, 3(10-117), pp. 47–55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.258939>
8. Сасно Ю.Л., Бараненко Т.К., Бараненко Е.Б. Зниження рівнів гармонічних спотворень в електричних мережах з джерелами інтергармонік. Електрифікація транспорту. 2012. № 3. С. 78–83
9. Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К., Бараненко Е.В. Методы компенсации реактивной мощности в сетях с нелинейными нагрузками. Вісник приазовського державного технічного університету. 2013. Вип. 26. С. 204–210.
10. Кузнецов В.Г., Куренный Э.Г., Лютый А.П. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения. Донецк: Норд-Пресс, 2005. — 250 с.

Received (Надійшла) 27.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.08.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Бурдейна Наталія Борисівна** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри фізики, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна;

**Nataliia Burdeina** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Physics, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;

e-mail: [burdeina.nb@knuba.edu.ua](mailto:burdeina.nb@knuba.edu.ua), ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2812-1387>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57220047954>.

**Підлісний Ярослав Анатолійович** – аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна;

**Yaroslav Pidlisnyi** – PhD student at the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Protection, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;

e-mail: [Pidlisnyi97@gmail.com](mailto:Pidlisnyi97@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0008-4906-3164>.

**Organisational and technical means of normalising ultra-low frequency electromagnetic field levels**

Nataliia Burdeina, Yaroslav Pidlisnyi

**Abstract.** The main approaches to normalizing the electromagnetic environment in general-purpose buildings and structures have been investigated. It has been determined that the most common resonant systems for simultaneous compensation of reactive power and suppression of higher harmonics and interharmonics of industrial frequency electric current (voltage) are ineffective in the presence of a complex spectrum of harmonics and interharmonics. It has been experimentally determined that in modern buildings and structures with a large number of electrical consumers with non-linear volt-ampere characteristics, the spectrum of interharmonics, including subharmonics, is complex and unpredictable. It has been shown that modern universal systems for suppressing harmonics and interharmonics are expensive and are suitable for use in enterprises with high electricity consumption for energy saving. A scheme for suppressing harmonics and interharmonics of industrial frequency electric current with feedback using a transformer is proposed. This approach is appropriate for unpredictable changes in the harmonic composition of the voltage in the power supply system. It is shown that interharmonics generation is also possible in buildings with a relatively small contribution of non-linear electrical consumers to the total load. Interharmonics can be generated as a result of modulation phenomena in voltage drop processes when powerful electrical consumers are switched on. The procedure for developing organizational and technical measures for electromagnetic safety based on electromagnetic monitoring is provided. It is emphasized that at the first stage of such work, it is necessary to ensure uniformity of the load on individual phases of the power grid, conduct a complete overhaul of reactive power compensation systems and eliminate leakage currents.

**Keywords:** electromagnetic safety, harmonics, interharmonics, electromagnetic monitoring.

В. А. Глива, Д. Б. Осадчий

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

## ЗАСОБИ НОРМАЛІЗАЦІЇ РІВНІВ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ НА ЕЛЕКТРИЧНИХ ПІДСТАНЦІЯХ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

**Анотація.** Досліджено рівні електромагнітних полів, шуму, концентрацій аероіонів у повітрі приміщень диспетчерських служб електричних підстанцій високої напруги. Встановлено, що напруженості електромагнітних полів промислової частоти та щільності потоків енергії електромагнітних полів ультрависокої частоти перебувають на нормативному рівні. Електромагнітні поля радіочастот та імпульсний шум перевищують гранично допустимі рівні. Спостерігається деіонізація повітря. Встановлено, що джерелом ненормативних рівнів полів є шафи вторинних ланцюгів. При цьому, біля релейних шаф концентрації аероіонів значно вищі за мінімально допустимі. Нормалізація рівнів електромагнітних та акустичних полів досягається застосуванням універсального перфорованого екрана, виготовленого з композиційного матеріалу на основі карбонільного заліза. Матриця виготовлялася зі стандартного лаку ХС. У результаті застосування екранування рівні електромагнітних полів радіодіапазону знижено до значень, набагато нижчих за нормативні. Індекси зниження шуму середніх та високих частот складає 8–12 дБ. Враховуючи, що імпульсний шум середньо та високочастотний, цей результат є задовільним. Нормалізація концентрацій аероіонів обох полярностей досягається за рахунок переміщення аероіонів від шаф вторинних ланцюгів робочих місць спрямованим рухом повітря крізь отвори електромагнітного та акустичного екрана. Перевагою композиційного екрана є відсутність накопичення статичних зарядів, які нейтралізують заряди аероіонів.

**Ключові слова:** електрична підстанція, електромагнітне поле, шум, аероіони.

### Вступ

Підстанції високої напруги є найбільш поширеними об'єктами критичної інфраструктури. Від стабільності їх роботи залежить безперебійне функціонування промислових підприємств, об'єктів інфраструктури тощо. Тому умови праці персоналу із обслуговування електричних підстанцій повинні забезпечувати максимально сприятливу обстановку для виконання службових обов'язків. В той же час на робочих місцях персоналу присутні техногенні чинники, які за певних умов можуть мати ненормативні значення. Це електромагнітні поля та електрозалежні фактори – деіонізація повітря та магнітний шум. У багатьох випадках ці фактори є взаємозалежними, тому засоби їх нормалізації доцільно розглядати у комплексі, що крім технічного може мати економічний ефект за рахунок застосування універсальних засобів захисту.

**Стан питання.** Безпечності енергетичних об'єктів для працюючих та населення приділяється багато уваги як в Україні, так і у світі. В Україні граничні рівні електромагнітних полів визначаються санітарними нормами [1], виробничого шуму [2], концентрацій аероіонів [3]. Усі вони мають незначні розбіжності із міжнародними нормативами. Дослідження електромагнітних полів та визначення засобів їх зниження стосуються, здебільшого, повітряних ліній електропередачі через їх велику розгалуженість [4, 5]. Дослідження щодо інших факторів – шуму, іонізації також стосуються системи передачі та перетворення електроенергії [6]. Більш сучасні дослідження у цьому напрямі виконані для офісних та побутових приміщень, що не відповідає умовам електричних підстанцій [7]. У дослідженнях [8, 9] визначалися та розроблялися засоби нормалізації електромагнітних полів, шуму та концентрацій аероіонів на об'єктах генерації електричної енергії. Зокрема показано, що на головних пунктах керування теплових

електростанцій рівні фізичних чинників потребують нормалізації. Але на таких робочих місцях електромагнітне оточення відрізняється від умов роботи диспетчерів електричних підстанцій високої напруги. Умовам праці на підстанціях високої напруги практично не приділяється уваги. Поодинокі роботи з цієї тематики [10] певним чином застаріли, тому актуальною задачею є дослідження рівнів фізичних чинників на електричних підстанціях високої напруги.

**Мета роботи** – дослідити рівні електромагнітних полів, концентрації аероіонів та шуму на робочих місцях персоналу електричних підстанцій високої напруги та визначити засоби їх нормалізації.

### Викладення основного матеріалу

Об'єктом дослідження була електрична підстанція з номінальною напругою 330 кВ. Вимірювання рівнів магнітних та електричних полів промислової частоти здійснювалися каліброваним приладом ПЗ-50, електромагнітних полів дуже високої частоти – ПЗ-31. Вимірювання концентрацій аероіонів обох полярностей – лічильником іонів МАС-01.

Рівні шуму визначалися шумоміром ОКТАВА-110А. Вимірювання здійснювались за умов штатного режиму роботи підстанції при типовому (номінальному) навантаженні.

Вимірювання напруженостей електричного та магнітного поля промислової частоти на робочих місцях персоналу підстанції (диспетчерів) свідчить, що напруженість електричного поля не перевищує 3 В/м, індукція магнітного поля – 0,25 мкТл. Щільності потоків енергії електромагнітних вимірювань ультрависоких частот – 11–24 мкВт/м<sup>2</sup>. Усі ці значення набагато нижчі за гранично допустимі рівні згідно [1]. Не дивлячись на наявність джерел магнітного та електричного поля великих напруженостей за межами приміщень, вони екрануються металевими конструкціями й розташовані на достатньо великій відстані. В той же час, має місце перевищення гранично

допустимих рівнів електромагнітних полів радіодіапазону. Визначено, що джерелом радіовипромінювання є шафи вторинних ланцюгів, та інші насичені комутаційними пристроями панелі систем технологічного керування підстанцією, які розташовані поблизу робочих місць. Таке розташування є типовим для усіх підстанцій високої напруги. При цьому біля шаф вторинних ланцюгів, спостерігаються високі концентрації аероіонів обох полярностей. Це обумовлене іскровими розрядами між контактами реле, які також є джерелами електромагнітних полів радіодіапазону. При цьому на робочих місцях персоналу концентрації аероіонів нижчі за нормативні ( $n^- = 600 \text{ см}^{-3}$ ,  $n^+ = 400 \text{ см}^{-3}$  [3]).

Приміщення диспетчерських обладнанні системою примусової вентиляції, тому було досліджено зміни аероіонного складу повітря у таких системах.

Вимірювання виконувалися за температури зовнішнього повітря  $27^\circ\text{C}$ , і температури у приміщенні  $-24^\circ\text{C}$ . Відносна вологість складала  $52\text{--}53\%$ . Тиск  $762\text{--}763 \text{ мм. рт. ст.}$  Повітровод вироблений з оцинкованого заліза. Переріз повітроводу  $0,5 \times 0,5 \text{ м}$ , довжина  $18 \text{ м}$ . Швидкість руху повітря у повітроводі  $6 \text{ м/с}$ . Результати вимірювань наведені у табл. 1.

Аналіз даних табл. 1 свідчить, що у повітропроводі системи примусової вентиляції відбувається часткова деіонізація повітря. Це добре корелює з результатами, отриманими у [11]. Деякі розбіжності обумовлені різницею перерізів повітроводів, нашаруванням пилу тощо.

Таблиця 1 – Зміна концентрації аероіонів на робочих місцях диспетчерів під впливом примусової вентиляції

Умови вимірювання	Концентрації аероіонів, $\text{см}^{-3}$	
	$n^-$	$n^+$
за межами приміщення	810–850	730–760
на робочих місцях (вентиляція вимкнена)	290–300	270–300
на робочих місцях (вентиляція ввімкнена)	250–320	390–410

Вимірювання рівнів шуму свідчить, що його еквівалентне значення  $L_{\text{екв}} = 62\text{--}67 \text{ дБА}$ , що приблизно відповідає нормативним умовам для роботи диспетчерських служб ( $65 \text{ дБА}$ , [2]). Але значення імпульсного шуму досягає  $72\text{--}75 \text{ дБА}$ . Джерелом цього шуму є спрацювання комутаційно-релейних пристроїв. Перевищення значення постійного шуму на  $7 \text{ дБ}$  вимагає врахування додаткового шуму згідно [2].

Враховуючи, що джерелами електромагнітних полів радіодіапазону та шуму є пристрої релейного захисту, і той факт, що поблизу цих пристроїв генеруються аероіони з високими концентраціями, доцільним є розроблення універсальних засобів нормалізації електромагнітного й електрозалежних фізичних чинників на робочих місцях персоналу. Схема розташування робочих місць, джерел фізичних чинників та засобів захисту наведено на рис. 1.

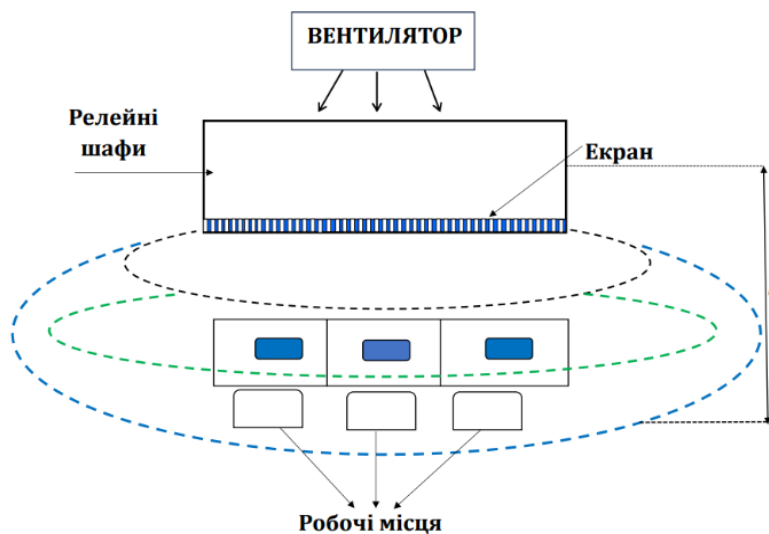


Рис. 1. Схема розташування робочих місць, джерел техногенних чинників та засобів захисту на електричній підстанції напругою  $330 \text{ кВ}$ :  $1 \text{ Н } 3 \text{ м}$ , концентрації аероіонів складають: 1)  $n^+ = 1100 \text{ см}^{-3}$ ,  $n^- = 900 \text{ см}^{-3}$ ; 2)  $n^+ = 700 \text{ см}^{-3}$ ,  $n^- = 800 \text{ см}^{-3}$ ; 3)  $n^+ = 500 \text{ см}^{-3}$ ,  $n^- = 600 \text{ см}^{-3}$

Вентилятор переносить потоком повітря аероіони, які генеруються шафами вторинних ланцюгів у бік робочих місць. Вимірювання свідчать, що на таких відстанях рекомбінація аероіонів не знижує їх концентрації до значень, нижчих з нормативні. При цьому концентрації аероіонів обох полярностей у зоні робочих місць перевищують мінімально допустимі значення. Тобто, навіть за умови нейтралізації аероіонів внаслідок електризації поверхонь (крісла,

поверхні столів, підлоги) зниження концентрацій нижче мінімального рівня не відбувається.

Електромагнітний та шумозахисний екран виготовлявся з металополімерного композиційного матеріалу на основі лаку ХС та карбонільного заліза. Товщина екрана складала  $5 \text{ мм}$ . Перфорація екрана утворюється отворами діаметрами  $30 \text{ мм}$ . Такі отвори є непроникними для електромагнітних полів радіодіапазону.

Ефективність екрана щодо екранування електромагнітних полів радіодіапазону наведено на рис. 2.

Шумозахисні властивості екрана наведено на рис. 3.

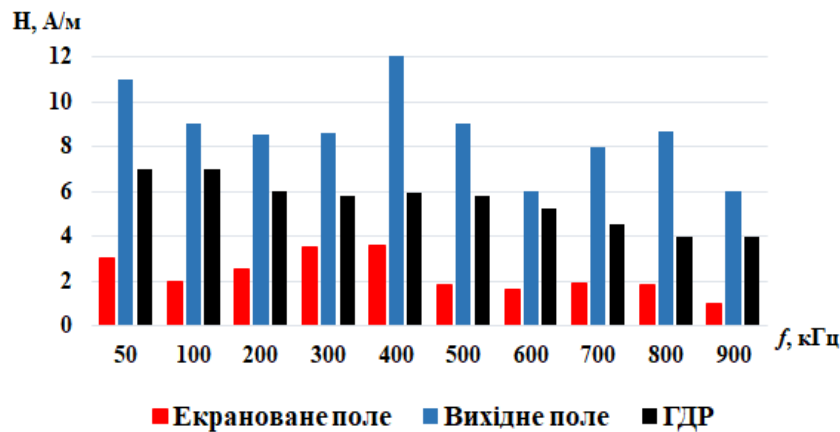


Рис. 2. Зниження напруженості магнітних складових електромагнітних полів радіодіапазону композиційним електромагнітним екраном

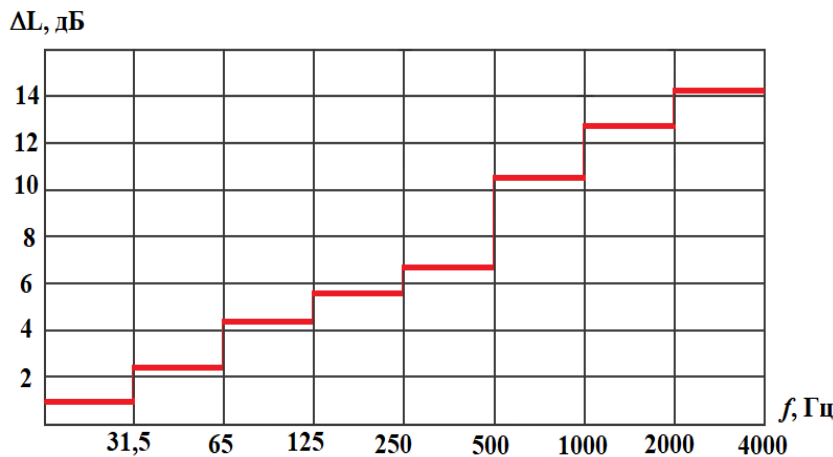


Рис. 3. Індекси зниження шуму захисним екраном у октавних смугах частот

Як видно з рис. 3, індекси зниження низькочастотного шуму незначні, що цілком прогнозовано, але зниження шуму середніх та високих частот задовільне.

Імпульсний шум середньо та високочастотний, тому прогнозований захист є ефективним.

Перфорація екрана сприяє шумопоглинанню та забезпечує перенос аероіонів, генерованих пристроями релейного захисту у зону перебування людей потоком повітря від вентилятора. Цей потік додатково забезпечує охолодження обладнання у теплу пору року.

Перевагою розробленого металополімерного матеріалу є відсутність електризації поверхні внаслідок трибоелектричного ефекту. На відміну від металевих екранів він не нейтралізує заряди аероіонів у процесі протікання повітря крізь отвори перфорації.

Наведена компоновка робочих місць та пристроїв релейного захисту є типовою для усіх електричних підстанцій високої напруги, починаючи з 35 кВ. Тому розроблені засоби нормалізації рівнів електромагнітних полів та електрозалежних фізичних чинників можна вважати універсальними.

## Висновки

1. Визначено, що головним джерелом ненормативних рівнів електромагнітних полів, концентрацій аероіонів у повітрі та шуму у приміщеннях диспетчеризації електромагнітних підстанцій високої напруги є шафи вторинних ланцюгів.

2. Розроблений комплекс організаційно-технічних заходів нормалізації рівнів фізичних чинників дозволяє одночасно нормалізувати напруженості електромагнітних полів радіодіапазону, концентрації аероіонів обох полярностей та рівні шуму.

3. Зниження рівнів електромагнітних та акустичних полів досягається за рахунок застосування перфорованого металополімерного екрана на основі карбонільного заліза.

Крім високої ефективності екранування такий матеріал не накопичує електростатичні заряди, які деіонізують повітря. Нормалізація аероіонного складу повітря на робочих місцях досягається переміщенням аероіонів від шаф вторинних ланцюгів, де вони генеруються, до робочих місць спрямованим потоком повітря.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСНіП 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів [Чинний від 2003-03-13]: затв. наказом М-ва охорони здоров'я України від 18.12.2002 р. № 476. Київ, 2003. 16 с. (Державні санітарні норми України).
2. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Постанова Міністерство охорони здоров'я від 01.12.1999 № 37. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va037282-99#Text>
3. ДСНтаП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», затв. Наказом МОЗ України від 8.04.2014 № 248. [Чинний від 2014-05-30] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#Text>
4. M. Rezinkina, O. Rezinkin, I. Karpaliuk and V. Grabko, "Control and Monitoring of Power Transmission Lines Condition over Wide Area with the Help of UAVs," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 172-175, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160150.
5. Карпалюк І. Т. Методи та засоби оцінки впливу коронного розряду на якість електропостачання: дис. д-ра техн. наук спец. 05.09.03: Харків, 2020. – 333 с.
6. Карпалюк І.Т., Гриб О.Г., Швець С.В. Рудевич Н.В., Захаренко Н.С. коронного розряду на струмопровідних частинах електричної системи за акустичними коливаннями. Науково-технічний збірник гірничо електро-механіка та автоматика Національного ТУ «Дніпровська політехніка»: Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2019. №102. С. 3–7
7. Volibrukh, B., Glyva, V., Kasatkina, N., Levchenko, L., Tykhenko, O., Panova, O., Bogatov, O., Petrunok, T., Aznaurian, I., & Zozulya, S. (2022). Monitoring and management ion concentrations in the air of industrial and public premises. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(10(115)), 24–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253110>.
8. Паньків Х.В., Глива В.А. Методи визначення та зниження впливу електромагнітних полів енергетичних об'єктів на персонал. Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. 2013. Вип. 758. С. 51–56.
9. Паньків Х.В. Нормалізація фізичних факторів виробничого середовища енергетичних об'єктів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 Київ, 2016. 22 с.
10. Шевченко С. Ю., Окунь А. А. Исследование электрических полей промышленной частоты типовых подстанций ВН в городской черте. Гігієна населених місць. 2011. Вип 58. С. 199–206.
11. Tykhenko, O., Glyva, V., Levchenko, L., Burdeina, N., Biruk, Y., Zozulya, S., Krasnianskyi, G., Nikolaiev, K., Aznaurian, I., & Zozulia, L. (2024). Study of air deionization factors. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(10 (128)), 26–33. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300909>

Received (Надійшла) 20.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.08.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Глива Валентин Анатолійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізики, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна;

**Valentyn Glyva** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Physics, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;

e-mail: [hlyva.va@knuba.edu.ua](mailto:hlyva.va@knuba.edu.ua), ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-1257-3351>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57210185162>.

**Осадчий Дмитро Борисович** – аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна;

**Dmytro Osadchyi** – PhD student at the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Protection, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;

e-mail: [osadchyi\\_db-2023@knuba.edu.ua](mailto:osadchyi_db-2023@knuba.edu.ua), ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0002-9977-8738>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59413002900>.

**Means of normalising the levels  
of physical factors at high-voltage electrical substations**

Valentyn Glyva, Dmytro Osadchyi

**Abstract.** The levels of electromagnetic fields, noise, and concentrations of air ions in the air of the premises of the control rooms of high-voltage electrical substations are investigated. It was found that the intensity of electromagnetic fields of industrial frequency and the density of energy flows of ultra-high frequency electromagnetic fields is at the standard level. Radio frequency electromagnetic fields and impulse noise exceed the maximum permissible levels. Air deionization is observed. It was established that the source of abnormal field levels is relay protection devices. At the same time, near the relay cabinets, the concentrations of air ions are significantly higher than the minimum permissible levels. Normalization of electromagnetic and acoustic field levels is achieved by using a universal perforated screen made of carbonyl iron composite material. The matrix was made of standard XC varnish. As a result of the shielding, the levels of electromagnetic fields in the radio range have been reduced to values far below the standard. The noise reduction indices for medium and high frequencies are 8–12 dB. Given that impulse noise is of medium and high frequency, this result is satisfactory. Normalization of air ion concentrations of both polarities is achieved by moving air ions from relay protection devices to workplaces by directed air movement through the openings of the electromagnetic and acoustic shield. The advantage of the composite screen is the absence of static charges that neutralize the charges of air ions.

**Keywords:** electrical substation, electromagnetic field, noise, air ions.

В. М. Гусев<sup>1</sup>, С. В. Зозуля<sup>2</sup>, Р. М. Левківський<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна;

<sup>2</sup> ДУ «Київський Авіаційний Інститут», Київ, Україна

## ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЗАХИСТУ ВІД ВПЛИВУ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ У ПРОЦЕСІ ВІДНОВЛЕННЯ БУДІВЕЛЬ

**Анотація.** Досліджено можливості створення композиційного матеріалу для одночасного блокування інфрачервоного випромінювання та екранування електромагнітних та акустичних полів широких частотних діапазонів. Модельний матеріал зроблено на основі латексу (матриці) та дрібнодисперсних наповнювачів з базальту та лускатого графіту. Базальтова компонента містить феромагнетика у кількості 18–20 %, що забезпечує екранування магнітної складової електромагнітного поля. Наведено розрахунковий апарат, який дозволяє попередньо визначити магнітні та електрофізичні показники композиції та оцінити термічний опір. Експериментально встановлено, що для блокування інфрачервоного випромінювання доцільно застосовувати матеріал завтовшки 10 мм. За такої товщини його термічний опір наближається до опору мінеральної вати товщиною 50 мм. Показано, що за товщини матеріалу від 4 мм спостерігається різке підвищення коефіцієнта екранування магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти. Підвищення коефіцієнта екранування електромагнітного поля частотою 2,45 ГГц зі збільшенням товщини матеріалу відбувається більш монотонно. За товщини, більшої за 4 мм ефективність екранування достатня для будь-якої інтенсивності зовнішнього поля. Досліджено індекси зниження шуму у октавних смугах частот. Для низьких частот звукового спектра вони складають 4–20 дБ, для середніх і високих частот – 34–46 дБ. Цей результат наближається до ефективності пористих шумозахисних матеріалів. Для розроблення промислової технології вироблення захисного композиційного матеріалу із забезпеченням досягнутих показників у якості матриці необхідно обрати матеріал з відносною діелектричною проникністю 34–40, яка відповідає діелектричним проникностям латексів.

**Ключові слова:** інфрачервоне випромінювання, електромагнітне поле, акустичний шум, екранування.

### Вступ

Внаслідок бойових дій та терористичних атак значна кількість будівель і споруд в Україні зазнала ушкоджень та потребує відновлення. Частина таких будівель має великі терміни експлуатації та споруджувалася без урахування сучасних вимог до енергозбереження, захисту від впливу шуму, електромагнітних полів техногенного походження тощо. Тому, у разі економічної доцільності відбудови таких об'єктів або коли вони є об'єктами історичної спадщини доцільно забезпечити у процесі їх відновлення високу енергоефективність та захист від впливу фізичних полів. На сьогодні існує багато матеріалів і виробів, призначених для термоізоляції об'єктів, шумопоглинання, екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Але забезпечення захисту від окремих впливів та блокування інфрачервоного випромінювання призводить до збільшення масогабаритних параметрів облицювання будівлі й може мати високу вартість. Тому доцільним є дослідження можливості застосування для цілей підвищення енергоефективності реконструйованої будівлі та захисту внутрішнього середовища, принаймні від шуму та електромагнітних полів й випромінювань одним універсальним матеріалом.

**Огляд літературних джерел.** Сучасною тенденцією у галузі підвищення енергоефективності будівель і споруд є застосування фазозмінних матеріалів, які спроможні циклічно накопичувати та віддавати теплову енергію [1, 2]. Головним наслідком такого підходу є доцільність застосування у новому будівництві. Це обумовлене необхідністю закладення таких конструкцій у проектні рішення. Значна частина досліджень спрямована на розроблення матеріалів малої товщини для цілей інфрачервоного камуфляжу

[3, 4]. Такі матеріали мають дуже високу ефективність, але й велику вартість. Через це вони неприйнятні у цивільному будівництві. Стандартні теплоізолюючі матеріали на основі мінеральної вати мають велику товщину. Це ускладнює їх застосування для облицювання поверхонь будівель старої забудови. У оглядовій роботі [5] показано, що можливо забезпечити зберігання тепла більш тонкими матеріалами, зокрема на основі базальтових волокон. На сьогодні базальтові волокна, сітки, арматура розглядаються як перспективні складові будівельних матеріалів. У дослідженні [6] показано, що застосування регулярних базальтових структур сприяє екрануванню електромагнітних полів та збереженню тепла. У роботах [7, 8] здійснене моделювання теплопереносу крізь шарувату структуру, головною компонентою якої є базальтова тканина. Дослідження [9] надає огляд усіх композицій для екранування електромагнітних полів на основі базальтових волокон. Наведені у роботі провідні компоненти, які додаються до базальту, мають високу вартість, тому доцільно дослідити можливість забезпечення достатніх коефіцієнтів екранування електромагнітних полів іншими композиціями на основі базальту, які містять більш дешеві наповнювачі, лускатий графіт, терморозширений графіт тощо.

**Мета роботи** – розроблення й дослідження захисних властивостей матеріалу для блокування інфрачервоного випромінювання та екранування акустичних і електромагнітних полів.

### Викладення основного матеріалу

На сьогодні вироби з базальтових волокон широко застосовуються для вироблення утеплювачів будівель. Вони мають товщини 50 мм та 100 мм, що не завжди зручно для облицювання поверхонь

складних форм. Доцільно розглянути можливість використання базальту у вигляді частинок різної дисперсності. Це пояснюється низькою теплопровідністю базальту, 1,3–1,5 Вт/мК, порівняно з іншими магматичними матеріалами. При цьому в Україні існує родовище базальту з великим вмістом сполук заліза (18–20 %), що обумовлює його магнітні властивості. Це спрощує застосування такого базальту для екранування електромагнітних полів. Для виготовлення зразків використовувався базальт з розмірами частинок 50–100 мкм. Для забезпечення екранування електромагнітного поля використовувався лускатий графіт з розмірами луски до 10 мкм. Для виготовлення модельних зразків використовувався рідкий латекс, який слугував матрицею.

Вимірювання теплоізолюючих властивостей матеріалів здійснювалося з використанням тепловізора UNI-T UTi120S. Вимірювання коефіцієнтів екранування магнітного поля промислової частоти здійснювалося вимірювачем напруженості електричного та магнітного поля ПЗ-50, коефіцієнтів екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти – ПЗ-31. Індекси зниження шуму визначалися за допомогою стаціонарної апаратури Брюль і К'єр у резерваційній камері.

Оцінка теплоізолюючих властивостей матеріалу визначалася зі співвідношень:

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{\lambda}{d}(T_1 - T_2),$$

де  $Q$  – кількість тепла,  $x$  – напрямок розповсюдження тепла,  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу,  $d$  – товщина матеріалу,  $T_1$ ,  $T_2$  – температури зовнішньої та внутрішньої поверхонь матеріалу. При цьому:

$$Q = \frac{1}{R}(T_1 - T_2),$$

де  $R$  – тепловий опір матеріалу.

Попередню оцінку ефективності екранування можна здійснити, розрахувавши електрофізичні властивості композиції за співвідношеннями Лорентца та Максвелла-Гарнета:

$$\mu = 1 + \frac{\nu_m(\mu_m - 1)}{1 + \frac{1 - \nu_m}{3}(\mu_m - 1)},$$

де  $\mu$  – ефективна магнітна проникність магнітодіелектрика,  $\mu_m$  – магнітна проникність наповнювача,  $\nu_m$  – об'ємний вміст наповнювача у матеріалі.

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_d}{\varepsilon + 2\varepsilon_d} = \nu_m \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_d}{\varepsilon_m + 2\varepsilon_d},$$

де  $\varepsilon_d$ ,  $\varepsilon_m$  – діелектричні проникності матриці та наповнювача,  $\nu_m$  – об'ємна доля наповнювача у діелектричній матриці.

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' = \varepsilon' + 4\pi\sigma/\omega,$$

де  $\varepsilon'$ ,  $\varepsilon''$  – дійсна та уявна складові комплексної діелектричної проникності матеріалу,  $\sigma$  – питома провідність матеріалу,  $\omega$  – колова частота електромагнітного поля.

Еквівалентна глибина проникнення поля у матеріал  $\delta$  визначається як:

$$\delta = \sqrt{2/(\omega\mu_a\sigma)},$$

де  $\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність матеріалу ( $\mu_a = \mu_0\mu$ ).

Слід враховувати, що така оцінка має велику похибку й може слугувати тільки для приблизної оцінки потрібного вмісту наповнювача у матриці.

Попереднє оцінювання поглинання шуму суцільним матеріалом недоцільне через вкрай високу залежність індексів зниження шуму від його частоти.

Дослідні зразки містили 20 % базальту (масових) та 3 % лускатого графіту.

Питома теплопровідність матеріалу не у певному обсязі характеризує термоізолюючі властивості у реальних умовах використання.

Ефективність захисту залежить від товщини матеріалу та теплообміну його поверхонь з оточуючим середовищем. Тому досліджувалася залежність теплового опору матеріалу від його товщини у стандартних умовах (рис. 1).

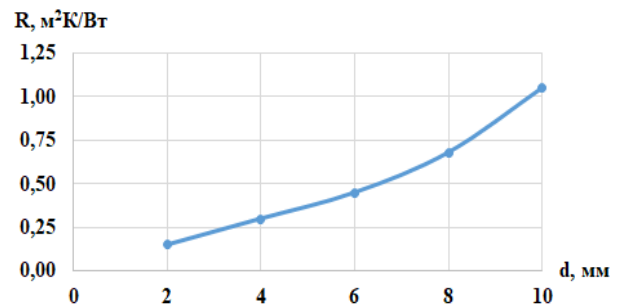


Рис. 1. Залежність теплового опору композиційного матеріалу від товщини

Отриманий результат свідчить, що матеріали малої товщини недостатньо ефективні. Але за товщини 10 мм тепловий опір наближається до опору мінеральної вати завтовшки 50 мм.

Згідно ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція» тепловий опір стін у температурній зоні I повинен бути 3,3 м²К/Вт, а у зоні II – 2,8 м²К/Вт. Але крім облицювання, тепловий опір забезпечують й будівельні конструкції. Тому значення 1,1–1,2 м²К/Вт для облицювального матеріалу завтовшки 10 мм можна вважати задовільним.

Проблематика забезпечення електромагнітної безпеки має дві складові – захист від електричних і магнітних складових електромагнітного поля промислової частоти та екранування електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот. Останнє актуальне через поступове впровадження мобільного зв'язку 5G. Електрична складова електромагнітного поля промислової частоти екрануються досить просто будь-яким електропровідним матеріалом навіть малої електропровідності. Магнітна складова екранується матеріалами, які мають магнітні властивості. Було досліджено ефективність екранування магнітного поля промислової частоти розробленими матеріалами (рис. 2).

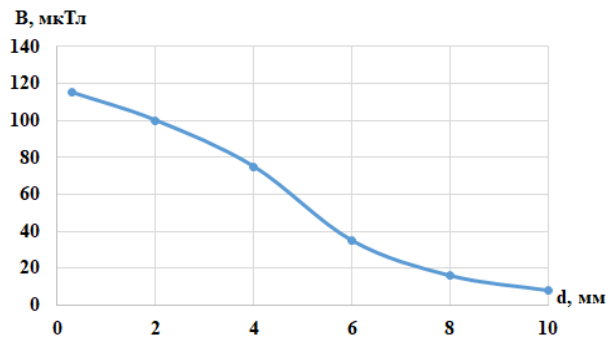


Рис. 2. Залежність індукції магнітного поля промислової частоти від товщини захисного композиційного матеріалу

Враховуючи, що джерелом магнітного поля був силовий трансформатор найбільш поширеного типу, ступінь екранування магнітного поля є прийнятним. Це випливає з того, що згідно з тимчасовими нормативами [10], індукція магнітного поля промислової частоти у житлових приміщеннях не повинна перевищувати 0,5 мкТл, на території житлової забудови – 10 мкТл. Аналогічні випробування були проведені

щодо електромагнітного поля ультрависокої частоти. Джерелом поля був магнетрон мікрохвильової печі. Частота – 2,45 ГГц (рис. 3).

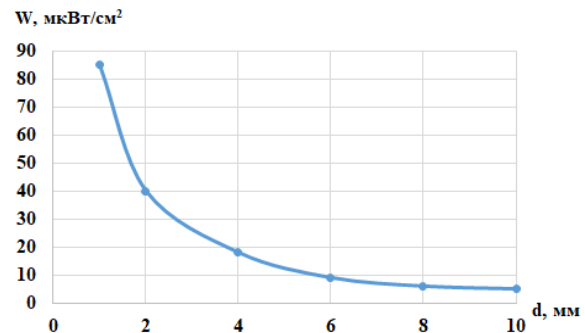


Рис. 3. Залежність щільності потоку енергії від товщини захисного композиційного матеріалу

Враховуючи, що прийнятий тепловий опір має матеріал завтовшки 10 мм, визначення індексів зниження шуму було проведено саме для такого матеріалу (табл. 1).

Таблиця 1 – Зниження шуму композиційним захисним матеріалом

Октавні смуги частот, Гц	Індекси зниження шуму, дБ									
	31,5	63	125	250	500	1К	2К	4К	8К	16К
Пінолатекс 10 мм	8	26	27	28	37	44	41	43	44	32

Індекс зниження шуму у низькочастотній області звукового спектра очікувано невеликий, що пов'язане з низьким згасанням низькочастотних коливань у будь-якому середовищі. Але захисні властивості щодо звуку середніх та високих частот задовільні. Цей результат практично збігається з наведеним у [11], де суттєве зниження рівнів шуму забезпечувалося неоднорідними матеріалами на основі пінолатексу та пінополістиролу, які не придатні для зовнішніх облицювань будівель. У процесі проектування захисту від впливу розглянутих фізичних чинників слід враховувати реальні потреби у термоізоляції конкретної будівлі та амплітудно-частотні характеристики шуму та електромагнітних полів за межами будівлі. Це дозволить обрати пріоритети щодо зниження впливу кожного чинника на стан внутрішнього середовища будівлі. Наприклад, згідно вимог міжнародного стандарту MPR II з безпечної експлуатації комп'ютерної техніки рівні магнітних полів у частотній смузі 5 Гц – 2 кГц не повинні перевищувати 250 нТл, а у смузі 2 кГц – 400 кГц – 20 нТл. Тому для приміщень і будівель з великою кількістю комп'ютеризованих робочих місць пріоритетом є зниження рівнів магнітних полів. Розроблений матеріал є модельним. Обрання латексу у якості матриці композиції обумовлене зручністю виготовлення зразків. У процесі розроблення промислової технології для прийнятного збігу показників з показниками дослідних матеріалів слід обрати матеріал матриці з відносною діелектричною проникністю 30–40, яка відповідає діелектричній проникності латексів.

## Висновки

1. Розроблено композиційний матеріал для одночасного блокування інфрачервоного випромінювання, екранування електромагнітних та акустичних полів. Такий матеріал призначений для нормалізації рівнів фізичних чинників усередині будівель у процесі їх відновлення та реконструкції. Мала товщина покриття, до 10 мм, дозволяє облицювати поверхні складних конфігурацій без змін зовнішнього вигляду будівель.

2. Визначено залежності теплового опору матеріалу від його товщини. Встановлено, що за товщини 10 мм тепловий опір матеріалу наближається до опору пористої мінеральної вати завтовшки 50 мм. Досліджено залежність ступенів екранування магнітних полів промислової частоти й електромагнітних полів ультрависокої частоти від товщини матеріалу. Встановлено, що товщини матеріалу більше 4 мм відбувається значне підвищення коефіцієнта екранування магнітного поля промислової частоти й електромагнітного поля ультрависокої частоти.

3. Досліджено індекси зниження шуму у октавних смугах частот матеріалом завтовшки 10 мм. Встановлено, що у низькочастотній області звукового спектра індекси зниження шуму складають 4–20 дБ, а для середніх і високих частот – 34–46 дБ. Отримані індекси наближаються до індексів зниження шуму пористих матеріалів непридатних для облицювання зовнішніх поверхонь будівель.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Yahya Sheikh, Mohammad O. Hamdan, Said Sakhi, A review on micro-encapsulated phase change materials (EPCM) used for thermal management and energy storage systems: Fundamentals, materials, synthesis and applications, Journal of Energy Storage, V. 72, Part C, 2023, 108472, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108472>.

2. Łach Ł., Svyetlichnyy D. 3D Model of Heat Flow during Diffusional Phase Transformations. *Materials*. 2023; 16(13):4865. <https://doi.org/10.3390/ma16134865>
3. Ho Kun Woo, Kai Zhou, Su-Kyung Kim, Adrian Manjarrez, Muhammad Jahidul Hoque, Tae-Yeon Seong, Lili Cai (2022). Visibly Transparent and Infrared Reflective Coatings for Personal Thermal Management and Thermal Camouflage. *Advanced Functional Materials*. V. 32, (38). <https://doi.org/10.1002/adfm.202201432>
4. Jeong, SM., Ahn, J., Choi, Y.K. et al. Development of a wearable infrared shield based on a polyurethane–antimony tin oxide composite fiber. *NPG Asia Mater* 12, 32 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41427-020-0213-z>
5. Qudama Al-Yasiri, Márta Szabó. Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: A comprehensive analysis. *Journal of Building Engineering*, Volume 36, 2021, 102122, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102122>
6. Burdeina, N., Levchenko, L., Korduba, I., Shamanskiy, S., Biruk, Y., M., Zozulya, S., Klymchuk, A., Nikolaiev, K., & Osadchyi, D. (2024). Applying heterogeneous building materials for the protection of people against electromagnetic radiation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10 (131)), 45–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313629>
7. V. Glyva, N. Burdeina, L. Levchenko, G. Krasnianskiy, Y. Biruk, M. Dovhanovsky. (2024). Modelling the thermal resistance of layered structures for blocking infrared radiation. *Strength of Materials and Theory of Structures*, (113), pp. 329–336, DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.329-336>
8. Levchenko, L., Bolibrukh, B., Kovalenko, O., Myshchenko, I., & Asieieva, L. (2025). MODELING OF INFRARED RADIATION PROPAGATION THROUGH THERMAL INSULATION SURFACES. *Advanced Information Systems*, 9(1), 43–48. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.1.05>
9. Sule Selcuk, Ubey Ahmetoglu, Emine Canbay Gokce. Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites (BFRP) other than rebars: A review. *Materials Today Communications*. Volume 37, 2023, 107359, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107359>
10. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008 Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика. Зі змінами. Київ. Науково-технічний центр електроенергетики «НЕК «Укренерго», 2016
11. V. Glyva, O. Zaporozhets, L. Levchenko, N. Burdeina, V. Nazarenko. Methodological Foundations Protective Structures Development For Shielding Electromagnetic And Acoustic Fields. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2023. Issue No. 110. PP. 245-255. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.245-255>

Received (Надійшла) 27.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.08.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Гусєв Віктор Миколайович** – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри безпеки життєдіяльності та професійно-прикладної фізичної підготовки, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна;

**Viktor Gusev** – Candidate of Engineering Sciences, Professor, Professor Department of Health and Safety, Professional and Applied Physical Training, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine;

e-mail: [v.n.gusev73@gmail.com](mailto:v.n.gusev73@gmail.com), ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-7775-2276>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57207470263>.

**Зозуля Сергій Васильович** – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету екологічної безпеки, інженерії та технології, ДУ «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна;

**Serhii Zozulya** – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Environmental Safety, Engineering and Technology, State Institution "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine;

e-mail: [SERGEYZOZ@ukr.net](mailto:SERGEYZOZ@ukr.net), ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-1192-8088>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57479434000>.

**Руслан Миколайович Левківський** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри судноводіння, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна;

**Ruslan Levkivskiy** – Candidate of Engineering Sciences, senior teacher Department of Navigation, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine;

e-mail: [levka.ru55555@gmail.com](mailto:levka.ru55555@gmail.com), ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3114-179X>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55918403200>.

**Means of improving energy efficiency and protection  
from the effects of physical fields in the process of building restoration**

Viktor Gusev, Serhii Zozulya, Ruslan Levkivskiy

**Abstract.** The possibilities of creating a composite material for simultaneous blocking of infrared radiation and shielding of electromagnetic and acoustic fields of wide frequency ranges have been investigated. The model material is made on the basis of latex (matrix) and finely dispersed fillers of basalt and flaky graphite. The basalt component contains 18–20 % ferromagnets, which provides shielding of the magnetic component of the electromagnetic field. A calculation tool is provided that allows preliminary determination of the magnetic and electrophysical properties of the composition and assessment of thermal resistance. It has been experimentally established that a material with a thickness of 10 mm is suitable for blocking infrared radiation. At this thickness, its thermal resistance is close to that of mineral wool with a thickness of 50 mm. It has been shown that with a material thickness of 4 mm, there is a sharp increase in the shielding coefficient of the magnetic component of the industrial frequency electromagnetic field. The increase in the shielding coefficient of the 2.45 GHz electromagnetic field with increasing material thickness is more monotonous. At thicknesses greater than 4 mm, the shielding efficiency is sufficient for any external field intensity. Noise reduction indices in octave frequency bands were investigated. For low frequencies of the sound spectrum, they are 4–20 dB, for medium and high frequencies – 34–46 dB. This result is close to the efficiency of porous noise-reducing materials. To develop industrial technology for the production of protective composite material with the achieved quality indicators, it is necessary to select a material with a relative dielectric permeability of 34–40, which corresponds to the dielectric permeabilities of latexes.

**Keywords:** infrared radiation, electromagnetic field, acoustic noise, shielding.

А. Н. Аль-Амморі<sup>1</sup>, Р. М. Іщенко<sup>1</sup>, П. В. Дяченко<sup>2</sup>, І. О. Німич<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний транспортний університет, Київ, Україна

<sup>2</sup> Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

## ФІЗИЧНІ МЕХАНІЗМИ СТВОРЕННЯ ТЕХНІЧНИХ КАНАЛІВ ВИТОКУ АКУСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

**Анотація.** **Актуальність.** Фізичні процеси, що виникають в технічних засобах і системах, створюють у навколишньому просторі побічні електромагнітні й акустичні випромінювання. Відповідно, для розробки ефективних методів і засобів захисту інформації необхідно розуміти фізичні основи створення зазначеного побічного випромінювання. **Об'єкт дослідження:** фізичні процеси, що призводять до виникнення технічних каналів витоку акустичної інформації **Мета статті:** розгляд фізичних механізмів створення технічних каналів витоку акустичної інформації та заходів щодо запобігання цим витокам інформації. **Результати дослідження.** У роботі з'ясовано, що акустичні та акустовібраційні канали витоку інформації утворюються в наслідок поширення акустичних хвиль в дифузійному та пружному середовищах відповідно. Акустоелектричні канали витоку інформації утворюються в наслідок паразитного перетворення акустичних сигналів в електричні на елементах електронних приладів. Акустооптоелектронні канали утворюються шляхом дистанційного зняття лазерними засобами вібраційних коливань поверхонь інженерних або будівельних конструкцій. Канали високочастотного нав'язування утворюються в наслідок випромінювання струмопровідними елементами модульованого високочастотного сигналу. **Висновки.** Таким чином, з'ясовано фізичні механізми створення технічних каналів витоку акустичної інформації на об'єкті інформаційної діяльності та розглянуто засоби захисту від них. Зокрема, спільним засобом захисту для усіх зазначених каналів витоку акустичної інформації є використання акустичного, вібраційного та лінійного зашумлення на об'єкті інформаційної діяльності.

**Ключові слова:** фізичний механізм, захист інформації, технічний канал, витік інформації, акустична хвиля.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Інтенсивний розвиток інформаційно-комунікаційних технологій та формування інформаційного суспільства обумовлюють виникнення питання щодо інформаційної безпеки. У зв'язку з цим, виникають проблеми, пов'язані з ефективним опрацюванням, оперативною передачею та надійним зберіганням даних [1]. Відповідно до цього, проблема надійного захисту інформації є актуальною науково-технічною задачею.

Використання різноманітних технічних засобів у всіх сферах людської діяльності призвело до появи технічних каналів витоку інформації. Фізичні процеси, що відбуваються в таких пристроях під час їхнього функціонування, створюють у навколишньому просторі побічні електромагнітні й акустичні випромінювання, що пов'язані з обробкою інформації. Неконтрольований витік інформації відбувається саме через побічні електромагнітні та акустичні випромінювання й наведення різноманітного походження. Для розробки ефективних методів і засобів захисту інформації [2], необхідно розуміти фізичні основи створення технічних каналів витоку інформації. Оскільки зазначений напрямок дослідження великий за обсягом, дана робота присвячена розгляду фізичних механізмів створення технічних каналів витоку акустичної інформації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У вітчизняній науково-технічній літературі існує ряд робіт, присвячених розгляду особливостей створення технічних каналів витоку інформації та мето-

дів і засобів захисту даних від вказаних каналів витоку. Зокрема, автором роботи [3] наведено визначення технічного каналу витоку інформації, виконано аналіз фізичних процесів, які знаходяться в основі функціонування різних технічних каналів витоку інформації. У роботі [4] розроблено структуру та визначено функції й основні характеристики елементів кіберфізичної системи моделювання методів та засобів технічного захисту акустичної інформації від витоку оптико-електронним каналом. У роботі [5] відзначено, що системи відеоспостереження доцільно використовувати на об'єктах інформаційної діяльності для запобігання витоку інформації, зокрема, використовувати функцію детектору руху в зазначених охоронних системах.

Зазначений напрямок дослідження представлений також і в закордонній науково-технічній літературі. Зокрема, у роботі [6] авторами розроблено метод захисту акустичної інформації, а саме – засекречування акустичних сигналів на основі криптографічних алгоритмів. У роботі [7] досліджено вплив стороннього електромагнітного випромінювання на працездатність різних електронних приладів. Визначено, що випромінювання субміліметрового діапазону може бути причиною відмов зазначених пристроїв. У роботі [8] запропоновано пасивні й активні заходи, спрямовані на захист інформації від витоку каналами побічних електромагнітних випромінювань. Зокрема, до пасивних заходів належать підвищення звукоізоляції огорожувальних конструкцій на об'єкті інформаційної діяльності, до активних – створення акустичних та віброакустичних перешкод у межах контрольованої зони.

Таким чином, з огляду як вітчизняної, так і закордонної науково-технічної літератури можна зробити висновок про те, що питання фізичних механізмів створення технічних каналів витоку акустичної інформації недостатньо вивчене та потребує подальшого дослідження.

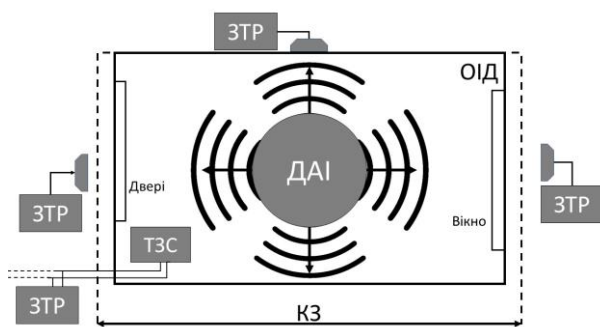
**Мета роботи** полягає у розгляді фізичних механізмів створення технічних каналів витоку акустичної інформації та заходів щодо запобігання цим витокам інформації.

### Основний матеріал

За результатами аналізу науково-технічної літератури, присвяченої дослідженню технічних каналів витоку інформації, зроблено висновок про те, що єдиного підходу до визначення та класифікації зазначених каналів немає. Узагальнивши результати дослідження інших авторів, було запропоновано розглядати технічний канал витоку інформації як фізичний шлях небезпечного сигналу від джерела до засобу технічної розвідки. У загальному випадку технічні канали витоку інформації поділяються на наступні: електричні (небезпечні електричні струми в різних струмопровідних елементах), електромагнітні (електромагнітне випромінювання різного діапазону), акустичні (поширення звукових коливань у будь-якому звукопровідному матеріалі), матеріально-речовинні (магнітні, оптичні носії, папір, фото тощо) [9, с. 22-24].

До технічних каналів витоку акустичної інформації належать такі: акустичні, акустовібраційні, акустоелектричні, акустооптоелектронні, канали високо-частотного нав'язування для зняття мовної інформації. Розглянемо фізичні механізми створення зазначених каналів та методи і засоби захисту від них.

*Акустичні* канали витоку інформації (рис. 1) утворюються в наслідок поширення акустичних хвиль від джерела акустичної інформації (ДАІ) тільки в дифузійному середовищі (гази, рідини, в яких молекули не мають пружних зв'язків).



**Рис. 1.** Акустичний, акустовібраційний та акустоелектричний канали витоку інформації

Такі канали утворюються шляхом перехоплення акустичних (мовних) сигналів з об'єкту інформаційної діяльності (ОІД) мікрофонами направленої дії та акустичними антенами. Зазначені засоби технічної розвідки (ЗТР) встановлюються за межами контрольованої зони (КЗ) в області прямої видимості з вікон та інших отворів ОІД. Запобігання витоку інформації акустичними каналами досягається такими способами: вико-

ристання огорожувальних конструкцій, які виключають ефект парусності, тобто стіни, стеля та підлога повинні бути досить масивними (залізобетонними, цегляними тощо); ліквідація щілин в огорожувальних конструкціях (шпаклювання тріщин, герметизація щілин звукоізолюючими матеріалами); використання в технологічних вікнах та системі вентиляції звукопоглинаючих резонаторів, систем та матеріалів; просторового акустичного зашумлення повітряного середовища зовні ОІД.

*Акустовібраційні* канали витоку інформації (див. рис. 1) утворюються внаслідок впливу акустичної хвилі (небезпечного акустичного сигналу) на поверхню твердого тіла, що призводить до його вібрації – коливання молекул твердого тіла, які можуть поширюватися на великі відстані (чим більша густина тіла, тим більша відстань поширення). Такими твердими тілами, по яким поширюється вібрація, можуть бути: стіни, стеля, підлога, скло вікон, система опалення, газопровід, труби водопостачання і водовідведення. Отже, використовуючи контактний мікрофон (стетоскоп), встановлений за межами КЗ, порушник може перехопити небезпечний акустичний сигнал, що поширюється з ОІД. Запобігання витоку інформації акустовібраційними каналами досягається наступними способами: покриття огорожувальних конструкцій ОІД звукопоглинаючими матеріалами та використання вібраційних розвантажувачів під час побудови систем опалення, газопостачання, водопостачання та водовідведення тощо; вібраційне зашумлення вище вказаних конструкцій і систем.

*Акустоелектричні* канали витоку інформації (див. рис. 1) утворюються шляхом паразитного перетворення акустичних сигналів в електричні на електронних компонентах технічних засобів та систем (ТЗС), розташованих на ОІД. Зокрема, вплив акустичного тиску на конденсатори і резистори, розташовані в електричних схемах приладів, призводить до вібрації та зміни лінійних розмірів зазначених елементів. Відомо, що електроємність плоского конденсатора ( $C$ ) та електричний опір резистору ( $R$ ) визначаються співвідношеннями:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S / d, \quad (1)$$

де  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – електрична стала;  $\epsilon$  – відносна діелектрична проникність ізолятора (діелектрика), розміщеного між обкладками конденсатора;  $S$  – площа обкладки конденсатора;  $d$  – відстань між обкладками конденсатора (або товщина шару діелектрика);

$$R = \rho \cdot l / S, \quad (2)$$

де  $\rho$  – питомий електричний опір матеріалу резистора (провідника);  $l$  – довжина резистора;  $S$  – площа поперечного перерізу резистора.

Отже, зміна лінійних розмірів конденсаторів і резисторів, спричинена впливом акустичного тиску, згідно з формулами (1) і (2) призводить до зміни їх електроємності та електричного опору відповідно. У свою чергу, зміна електроємності та електричного опору викликає зміну напруги і сили струму в електричному колі, що призводить до появи небезпечно-

го електричного сигналу. Якщо лінія, що пов'язана з електронними приладами, в яких під дією акустичного тиску виникає небезпечний електричний сигнал, виходить за межі КЗ, то порушник за допомогою ЗТР може перехопити зазначений електричний сигнал. Запобігання витоку інформації акустоелектричними каналами досягається такими способами: використання в електричних схемах технічних засобів, що затримують електричні сигнали низького рівня; використання в електричних схемах лінійного шумлення.

Акустооптоелектронні канали витоку інформації (рис. 2) утворюються шляхом дистанційного зняття лазерними засобами акустичної розвідки вібраційних коливань поверхонь інженерних або будівельних конструкцій на ОІД, що спричинені акустичним полем (небезпечним акустичним сигналом).

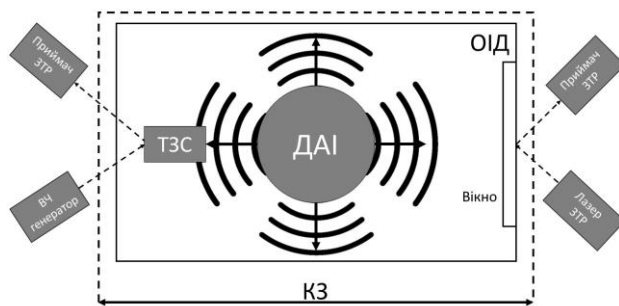


Рис. 2. Акустооптоелектронний та канал високочастотного нав'язування

Фізичний механізм акустооптоелектронних каналів витоку інформації полягає в наступному. На ОІД, де озвучується інформація, під впливом небезпечного акустичного сигналу знаходяться усі предмети. Деякі предмети, що мають оптичні властивості віддзеркалення, приводять до вібрації. Такими предметами є скло вікон, дзеркала тощо. Вібрація таких предметів пов'язана з коливанням їх поверхні. Якщо із зовні на поверхню скла або дзеркала, що вібрують, спрямувати лазерний промінь, то він відіб'ється від поверхні у вигляді модульованого променя (модуляція відбувається небезпечним акустичним сигналом). Відбитий модульований небезпечним акустичним сигналом лазерний промінь може бути перехоплений ЗТР зловмисника. В подальшому зазначений відбитий промінь демодулюють і виділяють потрібний акустичний сигнал. Запобігання витоку інформації акустооптоелектронними каналами досягається такими способами: використання вакуумних та інших захищених вікон; матування у вікнах зовнішньої поверхні скла; використання вібраційного шумлення зазначених конструкцій.

Канали високочастотного (ВЧ) нав'язування для зняття мовної інформації утворюються наступним чином. Якщо на струмопровідні елементи ТЗС або на лінії електроживлення чи заземлення

впливати ВЧ електромагнітним полем (первинним ВЧ сигналом), то в них виникатимуть електричні ВЧ струми (рис. 2). Якщо одночасно зазначений струмопровідний елемент знаходиться під дією акустичного тиску (викликаного небезпечним акустичним сигналом на ОІД) і вібруватиме, то в ньому відбуватимуться коливання власного електричного опору та здійснюватиметься його модуляція ВЧ струмом.

Такий струмопровідний елемент буде випромінювати модульований ВЧ сигнал (модуляція здійснюється небезпечним акустичним сигналом), який може поширюватися за межі КЗ та бути перехопленим ЗТР зловмисника. В подальшому, досліджуючи різницю між первинним і відбитим модульованим ВЧ сигналами, отримують інформацію про небезпечний акустичний сигнал. Запобігання витоку інформації каналами ВЧ нав'язування для зняття мовної інформації досягається наступними способами: використання просторового електромагнітного шумлення ОІД на частотах ВЧ випромінювання; індикація, сигналізація поля ВЧ випромінювання, тобто виявлення зазначеного випромінювання.

## Висновки

Таким чином, технічні канали витоку акустичної інформації поділяються на п'ять типів: акустичні, акустовібраційні, акустоелектричні, акустооптоелектронні та канали високочастотного нав'язування для зняття мовної інформації. Розглянуто фізичні механізми створення зазначених каналів витоку акустичної інформації. Зокрема, акустичні та акустовібраційні канали утворюються в наслідок поширення акустичних хвиль в дифузійному та пружному середовищах відповідно. Акустоелектричні канали витоку інформації утворюються в наслідок паразитного перетворення акустичних сигналів в електричні на елементах електронних приладів, що розташовані на об'єкті інформаційної діяльності. Акустооптоелектронні канали утворюються шляхом дистанційного зняття лазерними засобами вібраційних коливань поверхонь інженерних або будівельних конструкцій, що спричинені акустичним полем. Канали високочастотного нав'язування утворюються в наслідок випромінювання струмопровідними елементами модульованого високочастотного сигналу.

В залежності від типу технічного каналу витоку акустичної інформації використовуються ті чи інші засоби захисту від них. Зокрема, спільним засобом захисту для усіх зазначених каналів витоку акустичної інформації є використання акустичного, вібраційного та лінійного шумлення на об'єкті інформаційної діяльності.

В подальшому планується дослідження фізичних механізмів створення електромагнітних каналів витоку інформації.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Humeniuk, I., Kosterev, D., Sheihas, V. (2024). Method of optimizing the blocking means number of acoustic information leakage channels at information activity object. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, vol. 30, № 2, pp. 288-298. Doi: <https://doi.org/10.18372/2225-5036.30.19241>.

2. Аль-Амморі А.Н., Дехтяр М.М., Іщенко Р.М., Клочан А.С. Методи та засоби захисту інформації. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2024. № 1. С. 38-44. Doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.038>
3. Попович Н.І. Фізичні основи утворення технічних каналів витоку інформації. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика*. 2015. Випуск 37. С. 154-160. URL: <https://dSPACE.UZHNU.EDU.UA/jspui/bitstream/lib/15861/1/>
4. Kornienko, V., Kruchinin, O., Pliets, O., Herasina, O., Timofieiev, D. (2021). Cyberphysical modeling system for protection of acoustic information from leakage by optoelectronic channel. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, № 2, pp. 19-25. Doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2021-2-3>
5. Котенко А.М. Запобігання витоку інформації з обмеженим доступом матеріально-речовим каналом за рахунок використання систем відеоспостереження. *Сучасний захист інформації*. 2017. №1. С. 48-52. URL: <https://journals.dut.edu.ua/index.php/dataprotect/article/view/1411/1344>
6. Mozhaiev, M., Mozhaiev, O., Gnusov, Y., Strukov, V., Klimushin, P., Yevstrat, D. (2023). Analysis of acoustic information protection methods in critical applications. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, № 1 (23), pp. 96-107. Doi: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.096>
7. Serkov, A., Breslavets, V., Breslavets, J., Yakovenko, I., Yatsenko, I. (2024). Influence of pulse electromagnetic radiation on performance of electric radio products. *Control, Navigation and Communication Systems*, № 1, pp. 201-205. Doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.201>
8. Sydorkin, P., Nesterenko, S., Salnyk, S., Konotopets, M., Kulynich, O., Smolkov, O. (2021). Methods and techniques of protecting information from leakage by technical channels via side electromagnetic radiation. *Political Science and Security Studies Journal*, vol.2, № 3, pp. 16-25. Doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5534847>
9. Технічні канали витоку інформації. Порядок створення комплексів технічного захисту інформації / С.О. Іванченко, О.В. Гавриленко, О.А. Липський, А.С. Шевцов. – К.: ІСЗІ НТУУ «КПІ», 2016. – 104 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/15155>

Received (Надійшла) 15.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.08.2025

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Аль-Амморі Алі Нурддинович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, Національний транспортний університет, Київ, Україна;

**Ali Al-Ammouri** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Information Analysis and Information Security, National Transport University, Kyiv, Ukraine;

e-mail: [ammourilion@ukr.net](mailto:ammourilion@ukr.net); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-0375-6108>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57193071217>.

**Іщенко Руслан Миколайович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, Національний транспортний університет, Київ, Україна;

**Ruslan Ishchenko** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Information Analysis and Information Security, National Transport University, Kyiv, Ukraine;

e-mail: [rm\\_ishchenko@ukr.net](mailto:rm_ishchenko@ukr.net); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-0158-4020>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24774554000>.

**Дяченко Петро Васильович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та системного аналізу, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна;

**Petro Dyachenko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Computer Science and System Analysis, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine;

e-mail: [p.diachenko@chdtu.edu.ua](mailto:p.diachenko@chdtu.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-8475-5854>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57193452357>.

**Німич Іван Олександрович** – студент магістратури кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, Національний транспортний університет, Київ, Україна;

**Ivan Nimych** – Master's Student of Department of Information Analysis and Information Security, National Transport University, Kyiv, Ukraine;

e-mail: [in7264@gmail.com](mailto:in7264@gmail.com); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0001-1878-7783>.

#### Physical mechanisms of creation of technical leakage channels acoustic information

Ali Al-Ammouri, Ruslan Ishchenko, Petro Dyachenko, Ivan Nimych

**Abstract. Relevance.** Physical processes occurring in technical devices and systems create side electromagnetic and acoustic radiation in the surrounding space. Accordingly, to develop effective methods and means of information protection, it is necessary to understand the physical foundations of the creation of the specified side radiation. **Object of research:** physical processes leading to the appearance of technical channels of acoustic information leakage. **Purpose of the article:** to consider the physical mechanisms of creating technical channels of acoustic information leakage and measures to prevent these information leaks. **Research results.** The work revealed that acoustic and acousto-vibrational channels of information leakage are formed as a result of the propagation of acoustic waves in diffusive and elastic environment, respectively. Acoustoelectric channels of information leakage are formed as a result of the parasitic transformation of acoustic signals into electric ones on the elements of electronic devices. Acousto-optoelectronic channels are formed by removing the surface's oscillations of engineering or building constructions. Channels of high-frequency binding are formed as a result of radiation by conductive elements of a modulated high-frequency signal. **Conclusions.** Thus, the physical mechanisms of creating technical channels for the leakage of acoustic information at the object of information activity were clarified and means of protection against them were considered. In particular, a common means of protection for all these channels of acoustic information leakage is the use of acoustic, vibration and linear noise at the object of information activity.

**Keywords:** physical mechanism, information protection, technical channel, information leakage, acoustic wave.

Є. Ю. Глоба, В. Р. Смірнов, М. С. Нараєвський, В. М. Федорченко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ В КОРПОРАТИВНІЙ МЕРЕЖІ

**Анотація.** Актуальність дослідження полягає в тому, що існуючі методи виявлення аномалій нерідко демонструють недостатню точність та оперативність у реальних умовах експлуатації. **Об'єкт дослідження:** мережевий трафік корпоративної інформаційної системи, який аналізується з метою виявлення аномальної поведінки, що потенційно свідчить про кібератаки, порушення політик безпеки або внутрішні загрози. **Мета статті:** розробка, реалізація та експериментальне обґрунтування методу виявлення аномалій у корпоративній мережі на основі моделі автоенкодера, який дозволяє ефективно ідентифікувати відхилення від нормального мережевого трафіку без потреби в попередньо мічених даних. **Результати дослідження.** У процесі моделювання було згенеровано дані, які імітують типову та аномальну активність у мережі. Гістограми та boxplot вказують на те, що нормальні зразки характеризуються низьким і стабільним значенням середньоквадратичної похибки, тоді як аномальні – мають виражені відхилення. ROC-крива з  $AUC = 1.00$  підтверджує, що модель здатна безпомилково розрізнити обидві категорії. Матриця плутанини показала практично ідеальне співвідношення між передбаченими та фактичними мітками, що підтверджує високу точність і чутливість моделі. Тренувальна крива свідчить про стабільне навчання без перенавчання, а обраний динамічний поріг дозволив знизити рівень хибнопозитивних спрацювань до мінімуму. Запропонований підхід може бути інтегрований у системи моніторингу безпеки для виявлення нетипових активностей у режимі реального часу. **Висновки.** Проведені експерименти продемонстрували високу точність класифікації, чітке розділення нормальних і аномальних зразків за похибкою реконструкції, а також стабільність навчання моделі. Отримані результати підтверджують доцільність використання глибокого навчання для автоматизованого моніторингу мережевої безпеки, а запропонований метод може бути успішно застосований у реальних умовах корпоративної IT-інфраструктури для виявлення інцидентів безпеки в режимі реального часу.

**Ключові слова:** корпоративна мережа, виявлення аномалій, корпоративна мережа, мережевий трафік, автоенкодер, машинне навчання, кібербезпека, реконструктивна похибка, навчання без вчителя, нейронна мережа, профілювання поведінки, інформаційна безпека.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Сучасні корпоративні мережі є невід'ємною складовою цифрової інфраструктури будь-якої компанії, незалежно від її розміру та сфери діяльності. Вони забезпечують ключові процеси, такі як передача інформації, підтримка операційних та управлінських систем, комунікація між підрозділами, а також зовнішню взаємодію з клієнтами й партнерами. В умовах постійного зростання обсягу переданих і оброблених даних, а також ускладнення топології мереж, зростають ризики виникнення небезпечних ситуацій, зокрема аномальних подій, що можуть становити загрозу безпеці та стабільності інформаційних систем підприємств. Аномалії у корпоративних мережах проявляються як нестандартні або нетипові шаблони поведінки мережевих вузлів, користувачів чи програмного забезпечення. Вони можуть бути пов'язані як з потенційними кіберзагрозами (атаками на систему, вторгненням, зловмисним програмним забезпеченням, несанкціонованим доступом), так і з різного роду технічними проблемами (відмова обладнання, помилками програмного забезпечення, неефективністю налаштувань чи конфігурацій). Особливість таких аномалій полягає у тому, що їх важко своєчасно розпізнати за допомогою стандартних інструментів моніторингу й аналізу трафіку, оскільки вони часто не вписуються у попередньо задані моделі та правила, і можуть залишатися прихованими у великих обсягах даних. Загрози, що виникають у результаті аномальних подій, мають серйозні наслідки, серед яких особливо небезпечними є витоки конфіденційних даних, порушення працездатності бізнес-процесів, зниження продуктивності співробітників та суттєві

репутаційні втрати. Тому актуальним завданням є своєчасне і точне виявлення подібних подій з метою оперативного реагування та зменшення негативних наслідків. Сьогодні на ринку представлено велику кількість рішень для моніторингу мережевого трафіку, проте існуючі методи виявлення аномалій демонструють ряд суттєвих недоліків. До них належать висока кількість хибних спрацювань (помилкових позитивних або негативних сигналів), труднощі адаптації до змінних умов експлуатації, а також недостатня ефективність при роботі з великими обсягами даних у реальному часі. Ці недоліки стимулюють пошук нових підходів і методів, що дозволять ефективно виявляти та класифікувати аномалії в корпоративних мережах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасному науково-практичному середовищі проблема виявлення аномалій у корпоративних мережах стала однією з найбільш обговорюваних у сфері кібербезпеки та інтелектуального аналізу даних. Розвиток мережевої інфраструктури, зростання обсягів трафіку, поширення хмарних сервісів і віддаленої роботи значно ускладнили завдання виявлення загроз у реальному часі. Саме тому останні роки стали свідками стрімкого зростання інтересу до методів виявлення аномалій на основі штучного інтелекту, машинного навчання, гібридних та контекстно-орієнтованих підходів. Базові методи, наприклад, сигнатурний аналіз, добре зарекомендували себе у виявленні відомих загроз, однак вони нездатні розпізнавати нові або обфусковані атаки. У відповідь, з'явилися численні публікації, в яких обґрунтовується перехід до статистичних методів та автоматичної побудови профілю нормальної поведінки.

Стаття [1] присвячена огляду сучасних методів навчання без вчителя для виявлення аномалій у ча-

сових рядах. У ній розглядаються досягнення в галузі збору та аналізу даних, які призвели до накопичення великої кількості послідовних спостережень. Стаття підкреслює важливість видобування знань із таких даних, зокрема виявлення викидів або аномалій, що можуть сигналізувати про помилки, порушення чи значущі події. В роботі [2] автори проводять порівняння класичних алгоритмів машинного навчання і роблять висновок, що гібридні методи (машинне навчання + фільтрація ознак) перевищують по точності базові евристичні. Особливу увагу привертають методи глибокого навчання, зокрема автоенкодерів, LSTM-моделей та рекурентні нейронні мережі. Вони дозволяють моделювати складну часову структуру мережевого трафіку та виявляти аномалії без необхідності міток. У дослідженні [3] описано Kitsune – систему, що використовує ансамбль автоенкодерів для виявлення аномалій на основі flow-даних. Вона працює в реальному часі з низькою обчислювальною складністю, що робить її придатною для корпоративних мереж. Стаття [4] присвячена огляду сучасних підходів до виявлення аномалій у кіберфізичних системах. Оскільки такі системи глибоко інтегровані в інфраструктуру та автоматизацію сучасного світу, вони особливо вразливі до різноманітних загроз, включно з поломками обладнання, помилками сенсорів, збоями зв'язку та кібератаками. Аномалії в кіберфізичних системах можуть свідчити про несподівані порушення нормального функціонування, тому їх своєчасне виявлення є критично важливим для запобігання шкоді, зупинкам сервісів або навіть небезпечним аваріям. У статті систематизовано та порівняно підходи, які використовуються для виявлення таких аномалій. Зокрема, розглядаються методи машинного навчання, глибокого навчання, математичного моделювання. Також залишається проблема оцінки моделей виявлення аномалій в роботі [5] автори критикують популярні набори даних за низьку репрезентативність і пропонують створення нових сценаріїв на основі реального корпоративного трафіку.

**Метою роботи** є розробка удосконаленого методу виявлення аномалій у корпоративних мережах, який базується на сучасних підходах у сфері машинного навчання та штучного інтелекту. Запропонований метод має забезпечити високу точність, швидкість, адаптивність до динамічно змінних умов і низький рівень хибних спрацювань, що є критично важливим для оперативного прийняття рішень та забезпечення надійності функціонування інформаційних систем підприємств.

### Основний матеріал

Проблема виявлення аномалій у корпоративних мережах уже давно є предметом активного дослідження в галузі інформаційної безпеки. У різних підходах до її вирішення застосовуються як класичні методи аналізу даних, так і сучасні алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту [6]. Основна мета таких методів полягає у тому, щоб вчасно виявити нетипову поведінку в мережевому трафіку, яка потенційно може свідчити про загрозу, або про критичні відхилення в роботі систем. У цьому кон-

тексті важливою є здатність системи відокремлювати нормальну активність від аномальної, навіть за відсутності явної сигнатури загрози.

Традиційні методи, зокрема сигнатурний аналіз [7], орієнтовані на виявлення вже відомих шаблонів атак, що зберігаються у базі даних сигнатур. Вони ефективні у виявленні відомих загроз, однак повністю безсилі перед новими, раніше невідомими формами атак, особливо так званими атаками нульового дня. Крім того, сигнатурні системи вимагають постійного оновлення баз даних і часто створюють велике навантаження на систему безпеки через значну кількість перевірок.

У протиставу сигнатурним методам, аномалієорієнтовані методи ґрунтуються на побудові моделей «нормальної» поведінки мережі, з якими порівнюється поточна активність. Порушення встановленого шаблону вважається підозрілим і може бути маркером аномалії. Такі методи вимагають етапу навчання або збору статистики, проте вони здатні виявляти нові або раніше не зафіксовані загрози. Найчастіше вони реалізуються у вигляді статистичного аналізу або класифікаційних алгоритмів.

Серед статистичних методів найбільш поширеними є контроль середніх значень, дисперсії та інтервальных оцінок. У цьому випадку вся вхідна мережна інформація аналізується щодо відхилення від визначених статистичних параметрів. Висока точність можлива лише за умови стабільного трафіку та низької варіативності, що у динамічних корпоративних мережах спостерігається рідко.

Останніми роками зростає популярність методів машинного навчання, які дозволяють моделювати складні залежності між параметрами мережевого трафіку. Серед них виділяють класифікаційні підходи, алгоритми кластеризації та нейронні мережі. Такі моделі демонструють хорошу адаптивність до змін середовища, здатність до самооновлення та виявлення прихованих шаблонів, однак їх застосування потребує ретельної підготовки даних, високих обчислювальних ресурсів та кваліфікованого налаштування. У контексті корпоративної мережі важливо не лише виявити факт аномалії, а й локалізувати джерело загрози та оцінити її потенційну критичність. Для цього часто застосовують гібридні підходи, які поєднують сигнатурні методи з алгоритмами машинного навчання. Такі системи дозволяють ефективно працювати як з уже відомими шаблонами атак, так і з новими, невідомими загрозами, а також знижують ризик хибних спрацювань завдяки багаторівневій перевірці підозрілих дій.

Незважаючи на значний прогрес у цій галузі, всі існуючі методи мають певні обмеження, як у точності класифікації, так і в масштабованості та споживанні ресурсів. Це зумовлює необхідність розробки нових методів, які враховують специфіку корпоративного середовища, динаміку топології мережі, різноманітність трафіку та потребу в реальному часі виявляти аномальні дії без критичного впливу на продуктивність системи. У відповідь на виявлені обмеження традиційних підходів до виявлення аномалій постає потреба у створенні нового, більш гнучкого та адаптивного методу, здатного ефективно працювати в умовах

складного та динамічного корпоративного середовища. Пропонований у даній роботі метод поєднує переваги сучасних моделей глибокого навчання з принципами динамічного моделювання трафіку, забезпечуючи високу чутливість до нетипової активності при зниженні рівня хибнопозитивних спрацювань.

Основна ідея розробленого підходу полягає у використанні автоенкодера – симетричної нейромережевої архітектури, що навчається відтворювати нормальні шаблони поведінки мережі. Після етапу навчання мережа здатна виявляти відхилення на основі величини похибки реконструкції: чим більша похибка між вхідним і відтвореним трафіком, тим вищою є ймовірність того, що спостерігається аномалія. Завдяки цьому автоенкодер не потребує наявності явного маркування даних і може функціонувати в умовах слабкого або неповного навчального набору.

Однак, оскільки корпоративний трафік є багатопаровим, контекстно-залежним і змінним у часі, було запропоновано доповнити архітектуру рекурентними нейронними мережами типу LSTM, які дозволяють моделі зберігати інформацію про попередні стани та краще моделювати часову динаміку трафіку. У поєднанні з автоенкодером LSTM-механізм надає глибшу контекстуалізацію мережевої активності та дозволяє розрізнити короткочасні флуктуації від справжніх аномалій, пов'язаних з порушенням політик безпеки або зовнішнім впливом.

Ще однією важливою складовою методу є етап динамічного профілювання. На відміну від статичних моделей, що створюються лише один раз під час початкового навчання, у запропонованому підході профіль мережевої активності постійно оновлюється з урахуванням змін у структурі, користувацькій поведінці та політиках доступу. Це досягається через віконну адаптацію вагових коефіцієнтів моделі на основі нещодавніх «безпечних» даних, що дозволяє зменшити ймовірність хибних спрацювань у разі легітимних змін у системі (наприклад, нові користувачі, додаткові сервіси або змінений графік роботи).

З метою зменшення навантаження на обчислювальні ресурси та забезпечення масштабованості метод підтримує попереднє агрегаційне перетворення вхідного трафіку – зокрема, перехід від сирих пакетних даних до flow-структур, що узагальнюють інформацію про з'єднання (час початку, тривалість, IP-адреси, протоколи, обсяги переданої інформації тощо). Такий підхід суттєво знижує розмірність вхідного простору без втрати критично важливої інформації. Загальна структура методу включає п'ять етапів:

- 1) збір і попередня обробка мережевого трафіку (очищення, нормалізація, перетворення до flow-формату);

- 2) формування початкового профілю нормальної поведінки на основі історичних даних;

- 3) навчання автоенкодера з рекурентними компонентами;

- 4) безперервне моніторинг та обчислення похибки реконструкції з виявленням аномалій на основі адаптивного порогу;

- 5) оновлення профілю поведінки за допомогою віконного механізму, базується на довірених даних.

Запропонований метод поєднує глибину аналізу нейронних мереж із гнучкістю адаптивного моделювання, зберігаючи високу точність в умовах динамічних змін мережевої поведінки. У наступних розділах буде розглянуто особливості збору даних, реалізацію прототипу та результати експериментальної перевірки ефективності запропонованого методу.

На першому етапі система отримує первинні дані із корпоративної мережі у вигляді сирого мережевого трафіку. Це можуть бути: пакети даних; NetFlow або IPFIX-дані; системні логи; журнали з міжмережних екранів, проксі-серверів, SIEM-платформ тощо. Дані піддаються первинній обробці: очищенню, нормалізації та агрегації. На другому етапі з нормалізованих історичних даних створюється модель "нормальної" поведінки мережі: визначаються типові характеристики з'єднань (тривалість, обсяг, протоколи, частота); обчислюються статистичні параметри (середнє, дисперсія); формується база "нормальних" шаблонів трафіку. На третьому етапі на основі початкового профілю проводиться тренування автоенкодера або гібридної моделі: модель навчається відтворювати нормальні шаблони без аномалій; мінімізується похибка між входом і виходом; фіксується рівень допустимої похибки реконструкції. Нейромережа працює без потреби в мічених даних, що зручно для реального застосування. Цей профіль буде використовуватись як еталон для порівняння в майбутньому.

Четвертий етап передбачає подання мережевих даних на вхід навченої моделі у реальному часі: обчислюється похибка реконструкції; якщо похибка перевищує динамічний поріг – трафік визнається аномальним; система фіксує та передає сигнал про інцидент до модуля реагування.

Рішення може бути додатково перевірено з урахуванням контексту (час доби, тип користувача, критичність ресурсу тощо).

На останньому етапі у разі, якщо спостереження не класифікується як аномальне, або після ручної перевірки інциденту фахівцем, дані можуть бути використані для: оновлення моделі "нормальної" поведінки; поступового донавчання моделі; адаптації до змін у політиках, користувачах чи сервісах.

Це забезпечує живу адаптацію системи до нових умов, не втрачаючи контроль за безпекою. Цикл повторюється постійно, що дає змогу системі не лише виявляти потенційно шкідливу активність, а й навчатися на основі нових безпечних сценаріїв поведінки. Це суттєво знижує кількість хибних спрацювань і підвищує ефективність аналізу у складних умовах великомасштабної мережі.

Практична реалізація запропонованого методу виявлення аномалій у корпоративній мережі потребує поетапного конструювання програмної системи, яка поєднує механізми збору, обробки й аналізу даних, а також нейромережеву модель для визначення аномалій. Далі опишемо архітектуру програмного прототипу, обрані засоби розробки, ключові компоненти системи та особливості її інтеграції з корпоративною інфраструктурою. Розроблений прототип складається з п'яти логічних модулів, що працюють узгоджено в єдиному інформаційному потоці:

- модуль збору даних відповідає за перехоплення та збереження мережевого трафіку або його агрегованих представлень;

- модуль попередньої обробки здійснює очистку, нормалізацію та агрегацію трафіку в набори ознак, що можуть бути подані на вхід моделі;

- неймережева підсистема реалізує автоенкодер або автоенкодер з LSTM-компонентами для виявлення відхилень на основі похибки реконструкції.

- модуль моніторингу та логування постійно аналізує результати роботи неймережі, фіксує потенційні аномалії та створює звітні файли;

- модуль адаптації забезпечує періодичне оновлення поведінкового профілю мережі та за потреби ініціює перенавчання моделі на нових даних.

Для реалізації програмного прототипу було обрано мову Python, як найбільш придатну для швидкого прототипування систем машинного навчання, з використанням таких бібліотек і фреймворків:

- Scapy для перехоплення та парсингу мережевого трафіку;

- Pandas, NumPy для роботи з табличними даними та масивами ознак;

- Scikit-learn для попереднього аналізу даних та побудови базових моделей класифікації або кластеризації;

- TensorFlow для реалізації нейронної мережі автоенкодера з можливістю додавання LSTM-шарів;

- Loguru для ведення журналів подій та візуалізації результатів.

Для підтримки масштабованості реалізація передбачає обробку даних у потоковому режимі, використовуючи черги повідомлень.

Неймережевий автоенкодер побудовано за класичною симетричною структурою: вхідний шар: приймає набір нормалізованих ознак трафіку (кількість пакетів, середня затримка, протокол, тривалість сесії тощо); блок кодування: складається з кількох повноз'язних шарів зі зменшенням розмірності; декодувальний блок: симетрично відтворює вихідний вектор;

- LSTM-шари: додаються перед/після кодування для врахування часової залежності подій.

Функцією втрат є середньоквадратична похибка між вхідними й відтвореними ознаками. Під час розгортання модель виводить поточне значення похибки реконструкції, що порівнюється з адаптивним порогом для виявлення аномалій.

Реалізований прототип демонструє можливість повноцінного виявлення аномалій у корпоративному середовищі в реальному часі, з урахуванням часової динаміки поведінки та можливістю гнучкої адаптації до нових умов роботи.

Для перевірки роботи прототипу було обрано реалістичний псевдо-набір даних, стилізований під NSL-KDD (з 10+ ознаками: тривалість, кількість байтів, кількість з'єднань тощо), і на цьому наборі вчилася модель для локального тестування алгоритму. Згенерований набір даних, який імітує поведінку мережевого трафіку в корпоративному середовищі, містить 1000 нормальних зразків (позначені як label = 0); 50 аномальних зразків (label = 1), які мають значні відхилення у ключових параметрах. Для реалізації моделі автоенкодера використовувалося середовище Google Colab.

Аналіз графіків на рис. 1, побудованих за результатами роботи моделі виявлення аномалій у корпоративній мережі, дає змогу зробити низку важливих спостережень, що свідчать про ефективність використаного підходу. На першому графіку зображено ROC-криву, яка відображає співвідношення між рівнем хибнопозитивних та істинно позитивних спрацювань. Крива має чітко виражену форму, близьку до ідеальної, з різким підйомом у лівому верхньому куті. Площа під кривою становить 1.00, що свідчить про винятково високу точність моделі: вона безпомилково розрізняє нормальні та аномальні зразки. Такий результат підтверджує, що автоенкодер навчився точно відтворювати лише характерні шаблони нормальної поведінки, а будь-які відхилення визначаються як потенційно підозрілі з високим рівнем впевненості.

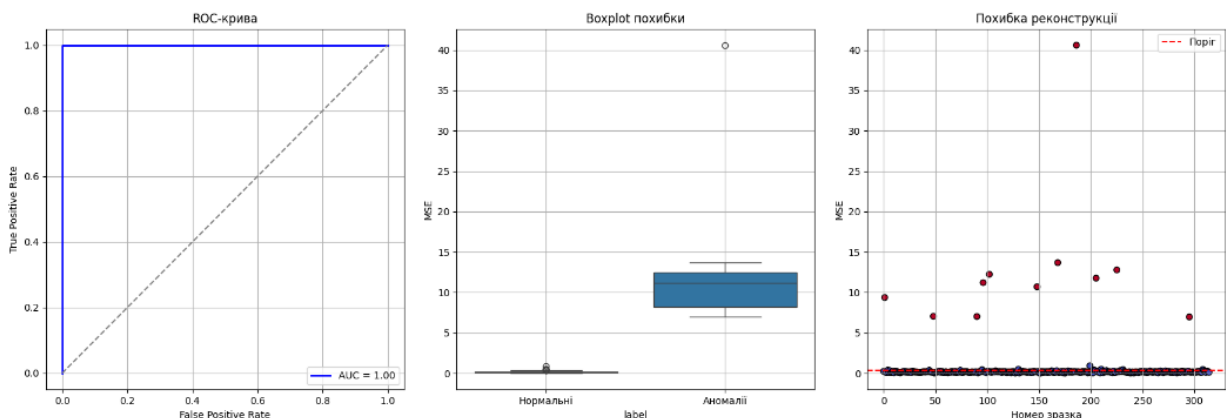


Рис. 1. Результати роботи моделі

Другий графік (boxplot похибок реконструкції) наочно демонструє контраст між нормальними та аномальними зразками. Для нормальних спостерігається надзвичайно щільне скупчення похибок у межах мінімальних значень, тоді як для аномальних характерна значна варіативність і розкид. Медіана

похибки для аномалій істотно перевищує навіть найвищі значення серед нормальних, що свідчить про суттєву відмінність між цими двома класами. Це вказує на те, що модель здатна формувати стійкий профіль "нормального" трафіку, і будь-які відхилення, навіть незначні, від нього миттєво ідентифікуються

як аномальні. Таке розділення між класами на рівні статистики похибки означає, що обраний метод має хорошу здатність до генералізації. Третій графік, що показує розподіл похибок реконструкції по кожному зразку, підтверджує попередні спостереження. Більшість точок, що відповідають нормальним зразкам, зосереджені в нижній частині графіка і розміщені нижче встановленого порогу, позначеного червоною пунктирною лінією. Водночас аномальні зразки мають виражені викиди – їхні похибки значно перевищують порогове значення. Це свідчить про чітке розмежування між звичайною та підозрілою поведінкою. Видимість таких різких відхилень ще раз підкреслює здатність автоенкодера не лише точно реконструювати "правильні" дані, а й виявляти нетипові шаблони, які виходять за межі навчального простору.

У сукупності результати, візуалізовані на графіках, підтверджують ефективність розробленого підходу до виявлення аномалій. Модель демонструє здатність до точного виявлення навіть одиничних відхилень без потреби уявно маркованих даних або надмірного втручання користувача. Це відкриває широкі перспективи її практичного застосування в умовах корпоративних мереж, де висока швидкість реагування на нестандартні ситуації та мінімізація хибно-позитивних спрацювань є критично важливими для підтримання кібербезпеки та цілісності інформаційної інфраструктури.

По графіках на рис. 2 можна зробити висновок, що матриця плутанини демонструє практично ідеальну класифікацію: усі нормальні зразки визначено правильно, а більшість аномальних також виявлено.

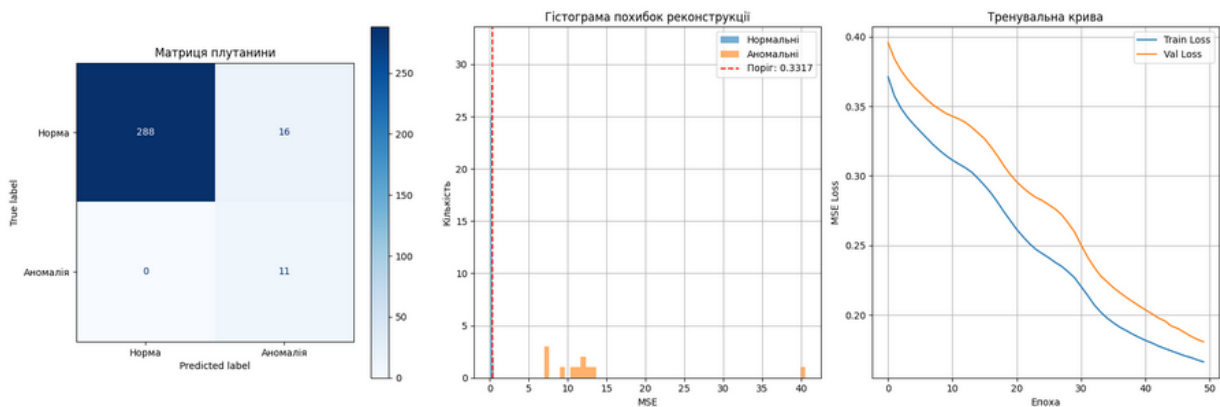


Рис. 2. Результати роботи

Це підтверджує надійність моделі. Гістограма похибок реконструкції показує чітке розділення: нормальні зразки мають низьку похибку, а аномальні – значно вищу. Обраний поріг ( $\approx 0.0237$ ) добре відокремлює ці класи. Тренувальна крива ілюструє поступове зниження похибки як на train-, так і на validation-наборах без перенавчання. Модель стабільно сходиться, що свідчить про ефективне навчання.

Таким чином, розроблений автоенкодер стабільно та точно виявляє аномалії у даних, з низьким рівнем помилок і високою відокремлюваністю класів.

### Висновки

Обґрунтовано, реалізовано та експериментально підтверджено ефективність методу виявлення аномалій у корпоративній мережі, що базується на використанні нейронної мережі автоенкодерного типу. Такий підхід передбачає створення моделі, здатної самостійно навчатися характеристикам нормального мережевого трафіку без залучення попередньо маркованих даних. Це особливо важливо для корпоративних інформаційних систем, де швидкість реагування та адаптивність до нових загроз мають критичне значення, а обмеження в доступі до мічених прикладів ускладнюють використання традиційних методів контролю.

В основі методу лежить принцип, згідно з яким автоенкодер добре реконструює лише ті зразки, які відповідають звичним, часто повторюваним шаблонам поведінки мережі. Усі нетипові чи невідомі варі-

анти трафіку, що не були представлені під час навчання, викликають суттєве зростання похибки реконструкції, що і дозволяє трактувати їх як потенційно небезпечні чи сумнівні. Аналіз результатів моделювання, що включав побудову кількох графіків, показав високий рівень точності, стабільності та узгодженості роботи моделі. Модель чітко розмежувала нормальні та аномальні зразки за допомогою порогу, визначеного на основі реконструктивної похибки. Водночас відсутність ознак перенавчання, що видно на графіку тренувальної динаміки, свідчить про здатність мережі узагальнювати поведінку без втрати точності.

Отримані результати доводять, що обраний підхід дозволяє досягти високої ефективності у завданні автоматичного виявлення відхилень у корпоративному трафіку. Перевагами методу є не лише його точність, а й гнучкість до масштабування, мінімальні вимоги до мічених даних та можливість інтеграції у вже існуючі системи інформаційної безпеки (наприклад, SIEM або SOC-платформи). Це дає підстави стверджувати, що подальше вдосконалення автоенкодерних моделей, зокрема шляхом врахування часової динаміки або впровадження контекстуальних ознак, може значно розширити спектр задач, які успішно вирішуються в рамках архітектур корпоративної безпеки. Таким чином, розроблена модель автоенкодера підтвердила свою здатність ефективно виконувати виявлення аномалій у середовищі з високим рівнем динаміки та ін-

формаційного навантаження. Вона може бути використана як основа для побудови інтелектуальних систем раннього виявлення загроз у реальних корпоративних мережах, де важливо своєчасно реагувати на будь-які нетипові дії або порушення у звичній схемі функціонування інформаційної інфраструктури.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Blazquez-Gartfa, A., Conde A., Mori U., Lozano J. A review on outlier/anomaly detection in time series data, ACM Comput. Surv. Vol. 54. No. 3. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/3444690>.
2. Vaishali Bhatia; Shabnam Choudhary; K.R Ramkumar. A Comparative Study on Various Intrusion Detection Techniques Using Machine Learning and Neural Network. 8th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO), 2020. <https://doi.org/10.1109/ICRITO48877.2020.9198008>
3. Y. Mirsky, T. Doitshman, Y. Elovici, A. Shabtai. Kitsune: An Ensemble of Autoencoders for Online Network Intrusion Detection. Cornell University. Computer Science, 2018. 15 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.09089>
4. D. Abshari, M. Sridhar. A Survey of Anomaly Detection in Cyber-Physical Systems, 2025. <https://arxiv.org/html/2502.13256v1>
5. M. Ring, S. Wunderlich, D. Scheuring, D. Landes, A. Hotho. A survey of network-based intrusion detection data sets. Elsevier. ScienceDirect. Computers & Security, vol. 86, 2019. P. 147-167. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.06.005>.
6. Flach P. A. Machine Learning: The Art and Science of Algorithms that Makes Sense of Data. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 291 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511973000>.
7. R. Abu-Zaid, A. Hammad. Streamlining Data Processing Efficiency in Large-Scale Applications: Proven Strategies for Optimizing Performance, Scalability, and Resource Utilization in Distributed Architectures. International Journal of Machine Intelligence. International Journal of Machine Intelligence for Smart Applications, 14(8), 2024. P. 31-49. <https://dljournals.com/index.php/IJMISA/article/view/27>.

Received (Надійшла) 02.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.08.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Глоба Єлизавета Юріївна** – студентка кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Yelyzaveta Hloba** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [yelyzaveta.hloba@nure.ua](mailto:yelyzaveta.hloba@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0002-2447-000X>.

**Смірнов Владислав Русланович** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Vladyslav Smirnov** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [vladyslav.smirnov@nure.ua](mailto:vladyslav.smirnov@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0008-8997-0324>.

**Нарасєвський Микола Сергійович** – бакалавр кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Mykola Naraievskiy** – bachelor, Department of Information Control System, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [mykolanaraievskiy@gmail.com](mailto:mykolanaraievskiy@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0002-4599-6975>.

**Федорченко Володимир Миколайович** кандидат технічних наук, електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Volodymyr Fedorchenko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [volodymyr.fedorchenko@nure.ua](mailto:volodymyr.fedorchenko@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-7359-1460>.

**Method for detecting anomalies in corporate networks**

Yelyzaveta Hloba, Vladyslav Smirnov, Mykola Naraievskiy, Volodymyr Fedorchenko

**Abstract.** The relevance of this study lies in the fact that existing anomaly detection methods often demonstrate insufficient accuracy and responsiveness in real-world operational environments. **The object of research:** the network traffic of a corporate information system, which is analyzed to detect abnormal behavior potentially indicating cyberattacks, security policy violations, or internal threats. **Purpose of the article:** the development, implementation, and experimental validation of an anomaly detection method for corporate networks based on an autoencoder model, which makes it possible to effectively identify deviations from normal network traffic without the need for pre-labeled data. **Research results.** In the modeling process, synthetic data simulating both typical and anomalous network activity was generated. Histograms and boxplots indicate that normal samples are characterized by low and stable mean squared error values, while anomalous samples demonstrate significant deviations. The ROC curve with AUC = 1.00 confirms that the model can reliably distinguish between the two categories. The confusion matrix showed a nearly perfect match between predicted and actual labels, indicating high accuracy and sensitivity of the model. The training curve demonstrates stable learning without overfitting, and the selected dynamic threshold minimized the false positive rate. The proposed approach can be integrated into security monitoring systems to detect atypical activities in real time. **Conclusions.** The conducted experiments demonstrated high classification accuracy, clear separation between normal and anomalous samples based on reconstruction error, and stable model training. The obtained results confirm the feasibility of using deep learning for automated network security monitoring, and the proposed method can be successfully applied in real corporate IT infrastructures to detect security incidents in real time.

**Keywords:** corporate network, anomaly detection, network traffic, autoencoder, machine learning, cybersecurity, reconstruction error, unsupervised learning, neural network, behavior profiling, information security.

О. І. Демченко, С. В. Чумаченко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ТЕХНОЛОГІЇ ПРОГРЕСИВНОГО КОРПУСУВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ

**Анотація.** **Актуальність.** З огляду на глобальне зростання попиту на передові напівпровідникові рішення, вдосконалення технологій Advanced packaging є стратегічно важливим для електронної промисловості. **Метою роботи** є аналіз сучасних тенденцій і основних викликів, пов'язаних із прогресивними технологіями корпусування ІМС, для подальшого вибору оптимальної моделі тестування між'єднань чиплетів. **Об'єктом дослідження** виступають технології компоновання та корпусування ІМС. **Предметом дослідження** є технологічні рішення та конструктивні особливості прогресивного корпусування й компоновання ІМС. До них належать 2.5-вимірні інтеграція, що забезпечує надвисоку щільність між'єднань, такі як інтеграція на рівні кремнієвого інтерпозера (CoWoS) і кремнієвого міжкристалного містка (EMIB). Також розглядаються матеріали та пов'язані технологічні процеси, які сприяють створенню ефективних між'єднань. **Результати.** У ході дослідження проаналізовано основні проблеми, що супроводжують сучасні технології корпусування, включаючи паразитні електричні характеристики, термічні навантаження та механічний стрес, що можуть впливати на довговічність і продуктивність ІМС. Розглянуто переваги та недоліки новітніх методів корпусування, зокрема технологій 2.5-вимірної інтеграції, які дозволяють значно підвищити щільність інтеграції компонентів, зменшити довжину електричних зв'язків і покращити тепловідведення. Представлено базу реалізації структури CoWoS і EMIB у мові опису апаратури Verilog як відправну точку для створення складніших моделей симуляції.

**Ключові слова:** Advanced Packaging, ASIC, 2.5D-IC, EMIB, CoWoS, Interposer, Chiplets, Wirebonding, Flip Chip симуляція, верифікація, тестування.

### Вступ

Основними чинниками розвитку прогресивного корпусування/пакування (Advanced Packaging) є необхідність вирішення низки викликів, що стоять перед виробниками спеціалізованих ІМС (ASIC). Серед них: продуктивність, енергоефективність, масо-габаритні характеристики, тривалість виробничого циклу та вартість. Наприклад, динамічна пам'ять, змонтована за традиційною схемою та з'єднана з процесором на друкованій платі, має обмежену пропускну здатність через відносно високий імпеданс таких з'єднань. Цей приклад також демонструє проблему інтеграції гетерогенних кристалів, тобто виконаних за різними технологіями. Пам'ять та процесор можуть суттєво відрізнитись як з точки зору і техпроцесу так і електричного інтерфейсу що додатково ускладнює інтеграцію. Вибір оптимальної моделі тестування між'єднань є ключовим для подальшого розвитку гетерогенних мікросистем. У цьому контексті розроблений стандарт IEEE P3405 відіграє важливу роль, оскільки регламентує методології оцінки між'єднань і сприяє підвищенню їхньої надійності [1]. Типові застосування рішень на основі прогресивних компоновок включають: ІМС для високопродуктивних обчислень (High Performance Computing), ІМС для Artificial Intelligence та Machine Learning, високопродуктивні графічні процесори, мережеві ASIC та напівпровідникові компоненти для мобільних пристроїв [2]. Вибір оптимальної моделі тестування між'єднань є суттєвою складовою для розвитку гетерогенних мікросистем [3]. Складність і вартість верифікації кристалів зростає через мікрометрові розміри, надмірну кількість контрольних точок [4], а також прихованість значної частини розводки в пакеті. У цьому контексті важливу роль відіграє стандарт IEEE P3405, оскільки регламентує методології оцінки між'єднань і сприяє підвищенню їхньої надійності. Крім того, класичні технології дротового

монтажу (Wirebonding) або монтажу методом переворотного кристалу (Flip Chip) на стандартних кульках припою (C4-бампи) забезпечують відносно невелику кількість з'єднань: сотні контактів при розміщенні по периметру кристала і тисячі при розміщенні по всій його площі [5]. Однак із зростанням рівня інтеграції ІМС цього стає недостатньо.

Ще серйознішим викликом є виробництво великих монолітних кристалів. Більшість літографічних процесів обмежують зону експонування кристала одним reticle ( $26 \times 33$  мм), а в деяких випадках — навіть до  $26 \times 16,5$  мм [6]. Навіть якщо вдається досягти більшої зони експонування, зворотно-пропорційна залежність між площею кристала та виходом справних чипів різко підвищує собівартість готового виробу. Це додатково посилюється значним зростанням вартості кремнієвих пластин для техпроцесів 7 нм і менше. Наприклад, ціна 300-мм кремнієвої пластини для 2 нм техпроцесу TSMC може сягати 30 тисяч доларів США. Щоб задовольнити ці вимоги, було розроблено цілу низку двовимірних (2D), дво- з половиною-вимірних (2,5D) і навіть тривимірних (3D) інтеграцій.

**Метою дослідження** є аналіз сучасних тенденцій і основних викликів, пов'язаних із прогресивними технологіями корпусування ІМС, для подальшого вибору оптимальної моделі тестування між'єднань чиплетів.

### Основна частина

Інтеграція ІМС з внутрішнім розведенням виводів Fan-In Wafer-Level Package (WLP) — це двовимірна технологія пакування ІМС, при якій розведення виводів здійснюється ще на етапі цілої пластини, на відміну від традиційного процесу, коли збірка окремих кристалів у пакети відбувається після розрізання пластини. Технологія забезпечує корпус із габаритами, наближеними до розміру кристала, з перерозподільним шаром (RDL) у межах його периметра, однак має обмеження щодо кількості виводів.

Коли існує необхідність отримати більшу кількість виводів то розповсюджують зону контактів за периметр кристалу. Таку технологію відносять до інтеграції з зовнішнім розведенням виводів (Fan-Out-WLP). Існує реалізація двома способами Chip First та Chip Last. У Chip First кристал спочатку встановлюється та обволочується компаундом, після чого прикріплюється до підложки і наостанок формується RDL. У Chip Last пакет спочатку створюється починаючи з RDL на підложці, а потім додається кристал і компаунд.

Інтеграція ІМС система на кристали (SoC) інтегрує ІМС з різними функціями, такими як центральний процесор, графічний процесор, пам'ять тощо, в один кристал для системи або підсистеми. Коли одного кристала недостатньо то можлива інтеграція Package-on-Package (PoP) цей метод компонування дозволяє вертикально поєднувати пакети кристалів в одному корпусі. Два або більше (через проблеми тепловідводу цього уникають [7]) пакетів встановлюються один на одному зі інтерфейсом для маршрутизації сигналів між ними. PoP забезпечує вищу щільність компонентів у пристроях, таких як мобільні телефони, цифрові камери, хоча і при цьому збільшується загальна висота компонента.

Особливу увагу заслуговують 2,5-вимірні інтеграції ІМС, до яких відносять різні технології на основі інтерпозера або кремнієвого моста. Інтерпозер — це тонка пластина (~100–200 мкм), виготовлена переважно з кремнію, хоча можливе використання й інших матеріалів, таких як скло або органічні сполуки. У цій пластині створені так звані міжперехідні з'єднання (Through Silicon Via – TSV для кремнію або Through Glass Via – TGV у випадку скла) [8]. Типовий діаметр таких з'єднань знаходиться в діапазоні 10–25 мкм. Після травлення або лазерної обробки отвори заповнюються міддю шляхом металізації. Інтерпозери підтримують високу щільність контактів – до  $10^6 \text{ см}^{-2}$ , що суттєво перевищує можливості керамічних або органічних пакетів, які зазвичай мають щільність близько  $10^3 \text{ см}^{-2}$ . Крім того, крок з'єднань (pitch) виводів на інтерпозерах може становити всього 5 мкм, тоді як у керамічних пакетах він на порядок більший. За функціональністю інтерпозери поділяються на: пасивні, які лише забезпечують електричні міжз'єднання та активні, що містять додаткові функції, наприклад, ретрансляцію сигналів.

Прикладом активних інтерпозерів є широкий клас ІМС пам'яті та логіки. Інтеграція логіки безпосередньо в інтерпозер покращує його функціональність, але водночас збільшує вартість та ускладнює проектування систем на його основі. Натомість пасивні інтерпозери зустрічаються частіше і зазвичай містять кілька шарів металізації для передачі сигналів і живлення, деякі мають вбудовані пасивні компоненти, такі як конденсатори.

Технологія інтерпозерів була розроблена як проміжний етап до 3D-інтегрованих систем, оскільки широке впровадження останніх потребує подолання численних технічних і логістичних викликів. Зокрема, відсутність єдиної моделі та налагодженого ланцюга постачання між різними учасниками виробничого процесу ускладнює їх впровадження. Через це інтерпозери, які еволюціонували з технологій багатокристалних модулів, мають менше виробничих обмежень і нижчу собівартість порівняно з 3D-інтеграцією. Це робить їх життєздатним

рішенням для забезпечення все більш складної комунікації між кристалами. Завдяки своїм перевагам технологія інтерпозерів швидко розвивається, а вдосконалення процесів виробництва та матеріалів сприяє її перетворенню на окрему перспективну технологію, а не просто проміжне рішення на шляху до 3D-систем. Серед недоліків які виникають при експлуатації інтерпозерів з металізованими міжперехідними з'єднаннями є ризик деформації структури пакету внаслідок суттєвої різниці між коефіцієнт теплового розширення міді та кремнію ( $16,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  проти  $2,6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ).

Альтернативою до TSV є використання вертикального з'єднання кристалів на двосторонньому інтерпозері за допомогою отворів через кремній (Through Silicon Hole – TSH) на підложці та зростанні мідних штифтів (10–20 мкм в діаметрі) на кристалах. Іншими словами, металізація отворів в підложці не виконується, натомість через ці отвори відбувається з'єднання мідних штифтів.

Однією з найвідоміших реалізацій технології інтерпозера є інтеграція CoWoS (Chip-on-Wafer-on-Substrate) від компанії TSMC. Першим виробом на платформі CoWoS був продукт для Xilinx в 2011 році з розміром інтерпозера відповідаючому  $1 \times \text{reticle}$  ( $26 \times 33 \text{ мм}$ ). Технологія існує в варіантах CoWoS-S, CoWoS-R та CoWoS-L [9].

CoWoS-S платформа інтеграції з кремнієвим інтерпозером і високощільними міжз'єднаннями, на великій площі (до  $3,3 \times \text{reticle} \sim 2700 \text{ мм}^2$ ) інтерпозера для розміщення різних функціональних верхніх кристалів, включно з логічними чиплетами та високошвидкісною пам'яттю (HBM).

CoWoS-R платформа інтеграції з органічним інтерпозером та RDL зовнішнім розведенням виводів) — використовує інтерпозер з RDL для з'єднання між системою на кристалі (SoC) та високошвидкісною пам'яттю (HBM), забезпечуючи гетерогенну інтеграцію. Інтерпозер RDL складається з полімерного матеріалу та мідних дорожок. CoWoS-L – це один із варіантів технології Chip Last на платформі CoWoS. Використовується інтерпозер із Local Silicon Interconnect (LSI) для міжкристалних з'єднань та шари перерозподілу (RDL) для передачі живлення та сигналів. Основні характеристики CoWoS: кристали LSI забезпечують високу щільність трасування міжкристалних з'єднань через декілька шарів субмікронних мідних провідників. Інтерпозер містить шари RDL із широким кроком для передачі сигналів і живлення. Це знижує втрати високочастотних сигналів під час швидкісної передачі даних. Серед інших недоліків варто відмітити: нижчий вихід при збільшенні розміру інтерпозера, складна верифікація 2,5-вимірних і 3-вимірних структур.

На рис. 1 представлений опис пакету інтерпозера з чиплетами на мові Verilog. Характерною властивістю є наявність одного інтерпозера на одразу кілька чиплетів. Порти пакету проходять через інтерпозер починаючи з нижчого рівня (порти з суфіксом bot) і закінчуючи рівнем вищим рівнем (порти з суфіксом top). За потреби деякі з портів розгалужуються на кілька різних кристалів, тоді як деякі біти портів призначені конкретним кристалом. Інакше – можлива підтримка різної топології розведення (1 до 1, 1 до багатьох).

Інший варіант 2,5-вимірної інтеграції є інтеграція на основі невеликого кремнієвого міжкристального містка – ЕМІВ (Embedded Multi-die Interconnect Bridge). Дана технологія пакування напівпровідників розроблена Intel, де невеликий вбудований кремнієвий міст відповідає за з'єднання кількох кристалів або чиплетів у межах одного корпусу. На відміну від одного великого кремнієвого інтерпозера, міст ЕМІВ охоплює лише ту область, яка необхідна для з'єднання конкретних кристалів, що робить сам міст більш компактним і економічно вигідним рішенням [10].

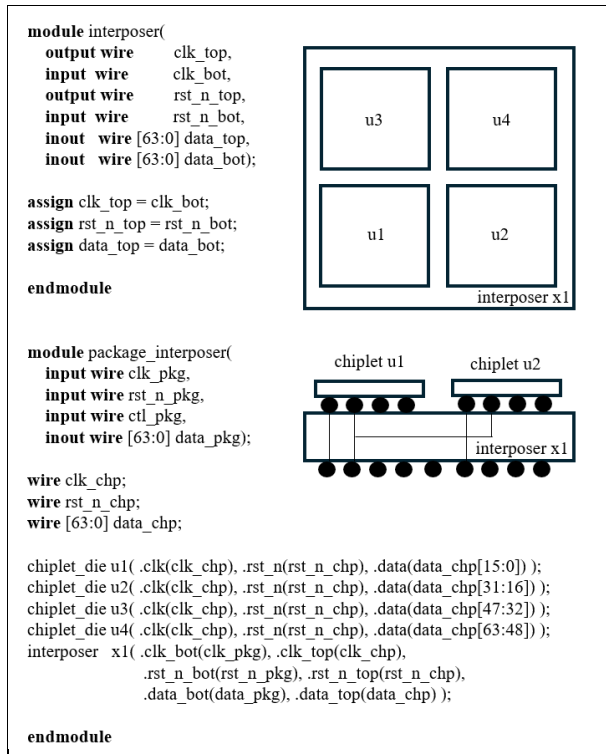


Рис. 1. Опис CoWoS пакету мовою Verilog

ЕМІВ дозволяє інтегрувати кілька кристалів у високо інтегровану систему SiP з можливістю використання кількох мостів ЕМІВ у межах одного корпусу. Цей підхід вимагає тісної спільної розробки кристалів, ЕМІВ і загальної архітектури корпусу для оптимізації продуктивності та вартості, на відміну від більш орієнтованого на інтерфейси кремнієвого інтерпозера. Ключова перевага технології полягає в можливості інтегрувати велику кількість кристалів в одному корпусі використовуючи при цьому невеликі кремнієві містки (1-5 мм ширини, до 10 мм довжини і 100 мкм товщини). Типовий розмір мікробампів складає 55 мкм, при цьому розмір бампів на містку може відрізнятися для інтеграції кристалів з іншим кроком з'єднань. Це може бути перевагою в тому сенсі, що відбувається локалізація мікробампів (використовується там де потрібно, а не по всій площі в випадку кремнієвого інтерпозера). До недоліків слід віднести меншу щільність з'єднань порівнянно до кремнієвого інтерпозера, меншу швидкість сигналів і гірший тепловий режим через використання полімерних матеріалів які оточують кремнієвий міст.

На рис. 2 представлений можливий опис ЕМІВ пакет з чиплетами мовою Verilog.

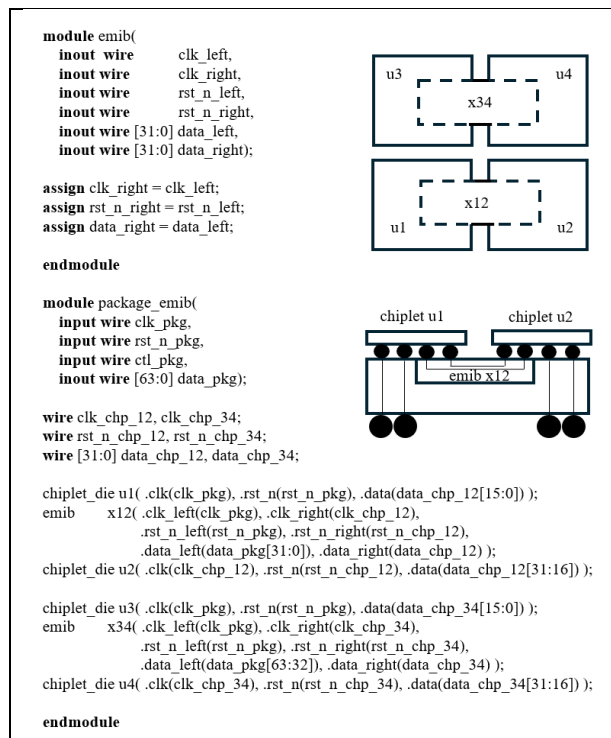


Рис. 2. Опис ЕМІВ пакету мовою Verilog

Характерною властивістю є наявність кількох мостів, кожен з яких поєднує пару чиплетів. Чиплети також можуть мати з'єднання поза мостом, наприклад зазвичай живлення реалізується таким чином.

## Висновки

Через об'єктивні виклики як на фізичному, так і на економічному рівні, традиційні підходи до корпусування та пакування ІМС поступово замінюються технологіями Advanced Packaging. У зв'язку з цим все більше рішень використовуватимуть 2,5D/3D інтеграцію на основі з'єднувального кристала (міжкристального містка чи інтерпозера) з надвисокою щільністю між'єднань (сотні тисяч – мільйони з'єднань між кристалами). Як зазначено в дорожній карті TSMC, компанія активно працює над збільшенням площі інтерпозера (переробляється літографічний процес, змінюються фотошаблони тощо), що дозволить збільшити кількість між'єднань у майбутньому. З освоєнням 2,5D інтеграцій, очікується активний рух у бік повноцінних 3D інтеграцій на основі активних інтерпозерів та споріднених технологій, які включають поєднання активних елементів і міжкристальних з'єднань. При цьому існуючі труднощі у досягненні надійних між'єднань не тільки не зникнуть, а й будуть ще більш множитись і загострюватись. Шляхами для подолання цих викликів є побудова оптимальної моделі тестування багатокристалів ІМС на різних етапах їх виробничого циклу – від проектування до тестування на етапах виробництва (Pre-Bond, Mid-Bond, Post-Bond). Перспективним є подальший розвиток описів багатокристалів структур з допомогою Verilog/SystemVerilog. Мови опису апаратури мають розвинений функціонал, здатний точно описати структурну компоновку таких виробів і провести симуляцію в рамках функціонального тестування. Більш того, це дозволить здійснювати симуляції з урахуванням

параметрів затримок сигналів (STA – статичний часовий аналіз) на різних елементах міжз'єднань. Така модель повинна враховувати існуючі технологічні обмеження на розмір контактних майданчиків тестових точок (у випадку мікроматрівок – це десятки нанометрів), їх обмежену кількість (збільшення розміру тестових майданчиків погіршує електричні характеристики високо-частотних сигналів і не несе функціональної користі після верифікації кристала), їх недоступність для безпосередніх операцій після певних етапів пакування, а також ризик фізичного пошкодження мікроматрівок через вплив зондувального обладнання.

Основна проблема – яку модель слід заадресувати, – це можливість швидкої і надійної верифікації багатотисячних міжкристалних з'єднань. Можливим підходом, який варто дослідити, це ранжирування провідників у wire-clusters (IEEE P3405) по певній геометричній характеристиці, щоб відокремити менші по кількості підкластери які мають більший вплив в рамках свого підкластера чим поза ним. Необхідно також використовувати прості векторно-логічні моделі для тестування чіплет-з'єднань, заздалегідь зробивши сегментацію сукупності з'єднань, оскільки їх у пакеті кристалів може бути біля 100 тис. [3, 11].

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Chiplet Interconnect Test and Repair in conjunction with IEEE European Test Symposium 2024. Thursday, May 23 – 24, 2024. <https://ets24.nl/index.php/workshops/citar/>
2. John H. Lau. Semiconductor Advanced Packaging. Springer, Singapore. – 2021. – 498 p.
3. Hahanov V., Gharibi W., Chumachenko S., Litvinova E. Vector Synthesis of Fault Testing Map For Logic. IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA). 2024. Vol. 13, No. 3. P. 293-306. DOI: [10.11591/ijra.v13i3.pp293-306](https://doi.org/10.11591/ijra.v13i3.pp293-306).
4. Paul D. Franzon, Erik Jan Marinissen, Muhannad S. Bakir. Handbook of 3D Integration. Wiley-VCH, 2019. Vol. 4. 488 p.
5. Andrea Chen, Randy Hsiao-Yu Lo. Semiconductor Packaging. Materials Interaction and Reliability. – CRC Press: Boca Raton, 2012. – 187 p.
6. IEEE International Roadmap for Devices and Systems, “Lithography and Patterning.” Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. DOI: [10.60627/khgq-xy87](https://doi.org/10.60627/khgq-xy87)
7. Vasilis F. Pavlidis, Ioannis Savidis, Eby G. Friedman. Three-Dimensional Integrated Circuit Design. Publisher, Newnes, 2017. 768 p.
8. Thomas M. Moore, Robert G. McKenna. Characterization of Integrated Circuit Packaging Materials: Butterworth-Heinemann, London, 2013, 274 c.
9. TSMC: Chip on Wafer on Substrate with silicon interposer (CoWoS). [Електронний ресурс]. – Available at URL <https://3dfabric.tsmc.com/english/dedicatedFoundry/technology/cowos.htm>
10. Mahajan R. et al., "Embedded Multidie Interconnect Bridge – A Localized, High-Density Multichip Packaging Interconnect," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – Oct. 2019. – Vol. 9, no. 10. – pp. 1952-1962. doi: 10.1109/TCPMT.2019.2942708.
11. Gharibi W. Vector-logic computing for faults-as-address deductive simulation / V. Hahanov, S. Chumachenko, E. Litvinova, I. Hahanov, I. Hahanova // IAES International Journal of Robotics and Automation. – 2023. – Т. 12. – №. 3. – С. 274-288. DOI: 10.11591/ijra.v12i3.pp274-288

Received (Надійшла) 14.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.08.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Демченко Олег Іванович** – аспірант кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Oleh Demchenko** – PhD student, Design Automation Department, Kharkiv National University of Radioelectronics, Ukraine; e-mail: [oleh.demchenko@nure.ua](mailto:oleh.demchenko@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0000-4406-8304>.

**Чумаченко Світлана Вікторівна** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харків, Україна;

**Svetlana Chumachenko** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [svetlana.chumachenko@nure.ua](mailto:svetlana.chumachenko@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0001-8913-1194>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57188710840>.

**Advanced packaging technologies for integrated circuits**

Oleg Demchenko, Svetlana Chumachenko

**Abstract. Relevance.** Given the global surge in demand for advanced semiconductor solutions, improving advanced packaging technologies is strategically important for the electronics industry. **The purpose** of this work is to analyze current trends and major challenges associated with advanced IC packaging technologies to support the selection of optimal chiplet interconnect testing models. **The object** of study is IC layout and packaging technologies. **The subject** of study includes technological solutions and design features of advanced IC packaging and layout. These include 2,5D integration, which enables ultra-high interconnect density, such as silicon interposer-based integration (CoWoS) and embedded multi-die interconnect bridge (EMIB). The study also considers materials and related technological processes that contribute to the creation of effective interconnects. **Results.** The study analyzes the key issues that accompany modern packaging technologies, including parasitic electrical characteristics, thermal loads, and mechanical stress, all of which can affect IC longevity and performance. It examines the advantages and drawbacks of advanced packaging methods, particularly 2,5D integration technologies, which significantly improve component integration density, reduce electrical interconnect lengths, and enhance heat dissipation. A basic implementation of CoWoS and EMIB structures in Verilog hardware description language is presented as a starting point for building more complex simulation models.

**Keywords:** Advanced Packaging, ASIC, 2,5D-IC, EMIB, CoWoS, Interposer, Chiplets, Wirebonding, Flip Chip, simulation, verification, testing.

О. В. Любченко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У АТМОСФЕРНО-ОПТИЧНІЙ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ОДНОМОДОВОГО БАГАТОЧАСТОТНОГО З СИНХРОНІЗАЦІЄЮ ПОЗДОВЖНИХ МОД ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

**Анотація.** Об'єктом дослідження даної роботи є атмосферно-оптичні лінії зв'язку з організацією передачі даних на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод лазерного випромінювання. **Мета** даної роботи полягає у представленні результатів оцінки ефективності передачі даних у атмосферно-оптичній лінії зв'язку на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод лазерного випромінювання за різними показниками. Запропоновано атмосферно-оптичну лінію зв'язку, до основних функцій якої відносяться наступні: виділення несучих частот зі спектру одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод лазерного випромінювання за допомогою пристрою формування каналів, що дозволяє використовувати окремі поздовжні моди; перетворення електричних інформаційних сигналів до формату, придатному для модуляції з несучими частотами, з подальшою їх модуляцією за амплітудою, інтенсивністю, частотою, фазою або поляризацією; оптична обробка та передача групового комбінованого оптичного інформаційного сигналу через бездротову лінію зв'язку до приймача, де відбувається фокусування, перетворення в електричний інформаційний сигнал та подальша обробка для виділення даних і їх передача до споживачів. Отримані результати математичного моделювання дозволяють здійснити оцінювання можливостей передавача лазерного випромінювання за різними показниками та свідчать про те, що запропоновану атмосферно-оптичну лінію зв'язку з організацією передачі даних на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод лазерного випромінювання корисно використовувати.

**Ключові слова:** передача даних, атмосферно-оптична лінія зв'язку, канал зв'язку, одномодове багаточастотне лазерне випромінювання, синхронізація поздовжніх мод, несуча частота, електричний інформаційний сигнал.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Сучасні атмосферні оптичні лінії зв'язку (АОЛЗ, або Free Space Optics, FSO), дозволяють як відмовитися від кабелів (їх монтаж, будівництво мереж, обслуговування кабелів тощо), так і забезпечити у стислі терміни створення недорогих надійних відкритих ліній зв'язку високої якості між віддаленими об'єктами та вирішити проблему «останньої милі». Передача даних (інформації) за допомогою лазерного випромінювання (ЛВ) є одним з найперспективніших методів для АОЛЗ. Така АОЛЗ нечутлива до перешкод радіодіапазону, що дозволяє їх використовувати у місцях з великою насиченістю радіотехнічних систем [1–6]. Імпульс ЛВ під час проходження у атмосфері не зазнає дисперсійних спотворень фронтів, що характерно для волоконних оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ). Така передача імпульсу дає змогу передавати потік даних зі швидкостями до терабіт за секунду. До основних переваг такого способу передачі даних можливо віднести наступні: висока швидкість передачі даних, простота інсталяції, а також відсутність необхідності плати за використання частотного діапазону.

АОЛЗ забезпечує передачу даних до 10 Гбіт/с, що дає змогу: вирішувати проблему «останньої милі» за високої захищеності каналу зв'язку (КЗ); розвивати міські мережі передачі даних та голосу (Metropolitan Area Network, MAN); розвивати рішення WDM (хвильове мультиплексування) для мереж SONET/SDH.

WDM (хвильове мультиплексування) – дає змогу значно збільшити пропускну спроможність мереж SONET/SDH завдяки передаванню декількох сигналів на різних довжинах хвиль по одному оптичному волокну ВОЛЗ. Це досягається за рахунок поділу спектра оптичного волокна на окремі канали, кожен з яких займає свою довжину хвилі. Таким чином, замість однієї

«дороги» (довжини хвилі) у SONET/SDH, WDM надає безліч «доріг» (довжин хвиль), даючи змогу передавати більше даних одночасно.

АОЛЗ, що основані на використанні одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ мають велику пропускну здатність, яка обумовлена високим значенням несучих частот, що забезпечує передачу даних (інформації) як великих об'ємів, так і з великою швидкістю [7].

При цьому, мала кутова розбіжність ЛВ забезпечує високі як просторову прихованість, так і енергетичну стійкість передачі даних по відкритому каналу зв'язку при малих габаритах приймально-передавальної апаратури.

Завдяки синхронізації поздовжніх мод можливо як досягти високих вихідних характеристик ЛВ, так і сформувати декілька каналів передачі даних (інформації) на несучих частотах.

Таким чином, оцінка ефективності передачі даних у АОЛЗ на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ за різними показниками є актуальним науковим завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У [1] здійснено постановку задачі структурного синтезу атмосферно-оптичної системи та досліджено методи визначення їх критеріїв ефективності. Проведено аналіз методів оцінювання впливу радіоактивного випромінювання на АОЛЗ. У [2] проведено аналіз шляху розвитку технології LTE. Досліджено технологію OFDM та визначено властивості, які дозволяють забезпечити вимоги для систем доступу на базі LTE. Встановлено, що в системах зв'язку, де особливо жорсткі вимоги до завадостійкості передачі інформації, найефективнішим є використання багатопозиційних сигналів з амплітудно-фазовою модуляцією. У [3] розкрито багаторівневу архітектуру та теорію побудови сучасних і перспективних

телекомунікаційних систем та мереж. Однак, розглянути публікації не враховують особливості спектру ЛВ з боку синхронізації поздовжніх мод та можливість передачі даних на несучих частотах.

**Мета статті** – провести оцінку ефективності передачі даних у АОЛЗ на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ за різними показниками, що є актуальним науковим завданням.

### Основна частина

Сучасні АОЛЗ дозволяють створювати надійні канали зв'язку на відстанях від метрів до десятків кілометрів в умовах атмосфери. До основних переваг АОЛЗ можливо віднести такі:

1. АОЛЗ не використовують радіодіапазон та не створюють перешкод у радіочастотному спектрі.

Обладнання АОЛЗ не потрапляє під дію Закону, який регламентує роботу з радіозасобами, що працюють у діапазоні до 400 ГГц. Реальні частоти оптичних передавачів у тисячі разів вищі за встановлену межу. Оптичні передавачі не призводять до порушення роботи радіосистем та обладнання.

2. АОЛЗ не потребує дозволів на розгортання та відповідних регулювальних органів.

У містах (мегаполісах) доступні частоти настільки сильно «заселені», що дана перевага відіграє домінуючу роль. Час, необхідний на підготовку та отримання документів для експлуатації радіосистем, становить близько півроку, якщо взагалі вільний діапазон є у наявності. Підготовчий етап для розгортання АОЛЗ може складати декілька годин.

3. Простота встановлення елементів АОЛЗ та під'єднання до мережі.

Оптичне обладнання АОЛЗ потребує мінімальних потужностей для роботи, швидко під'єднується до портів мережевого (телекомунікаційного) обладнання та не потребує багато місця для розміщення.

4. Малий час на розгортання АОЛЗ.

Прямий наслідок попередньої переваги АОЛЗ. У деяких випадках необхідне швидке розгортання зв'язку. Інфрачервону (ІЧ) систему пара фахівців може встановити за 1-2 год для великих відстаней (понад 1 км) та за 15-20 хв – для коротких.

5. У АОЛЗ немає річної орендної плати.

Робота обладнання АОЛЗ не пов'язана з регулярними платежами за користування середовищем передачі даних на відміну від радіо систем.

6. У АОЛЗ швидке повернення інвестицій.

Швидке встановлення обладнання АОЛЗ дає змогу оператору отримувати дохід від експлуатації лінії зв'язку без затримок. У звичайному випадку, за час, витрачений на розгортання дротових комунікацій або радіо систем, оператор має тільки витрати.

7. АОЛЗ не чутливі до радіоперешкод.

Встановлення бездротових оптичних прийомо-передавачів АОЛЗ можливо у зонах з високими перешкодами від радіообладнання (промислового) обладнання, де використання радіосистем проблематичне.

8. У АОЛЗ повна пропускна здатність КЗ.

Пропускна здатність каналу зв'язку АОЛЗ використовується повністю, без витрат на організацію

з'єднання та підтримання його у активному стані.

9. Прозорий механізм передачі даних у АОЛЗ.

Прозорість технології передачі даних призводить до того, що, насправді, ІЧ-системи є усього лише конверторами середовища передачі та еквівалентні звичайному оптичному кабелю, для якого немає особливої різниці у протоколах передачі даних тощо.

10. У АОЛЗ відсутня затримка у каналі зв'язку.

Відсутність складних перетворень сигналу призводить до того, що затримка у каналі передачі даних, що вноситься оптичною системою, незначна. Відсутнє обмеження на швидкість передачі даних, що є однією з ключових технічних переваг оптичних систем зв'язку, яка викликала бурхливе зростання інтересу до технології серед виробників і потенційних замовників.

11. АОЛЗ стійкі до температурних та кліматичних змін.

АОЛЗ працюють як у районах крайньої півночі, так і в умовах тропічної спеки.

12. У АОЛЗ висока закритість каналу зв'язку.

Жодна бездротова технологія передачі даних не може запропонувати таку конфіденційність зв'язку, як АОЛЗ. Перехопити сигнал можливо тільки встановивши сканери приймачі безпосередньо у ЛВ від передавачів. Перехоплення даних практично неможливо. Наявність ЛВ не можливо визначити за допомогою різних сканерів.

Раніше фахівці виділяли два основних недоліка у АОЛЗ – це малий час на напрацювання на відмову (показник Mean Time Between Failures, MTBF) випромінювального елемента (лазерного діода або світлодіода) та залежність відстані передачі сигналу від погодних умов. Перший недолік виробники лазерних діодів вирішили – діоди з потужністю до 100 мВт здатні забезпечити MTBF, що дорівнює 150 тис. годин (15 років роботи у штатному режимі). У АОЛЗ застосовуються схеми Adaptive Power Control (APC), що керують потужністю ЛВ залежно від атмосферних умов. Наприклад, у ясну погоду потужність ЛВ мінімальна. Такі схеми дають змогу продовжити термін життя лазерних пристроїв та підвищити їх надійність. Другий недолік, який пов'язаний із зниженням доступності каналу зв'язку при зменшенні метеорологічної дальності видимості (МДВ) до 100-200 м частково вирішується попаданням ЛВ у вікна прозорості атмосфери тощо.

Основний «винуватець» перебоїв у зв'язку АОЛЗ є туман. При МДВ менше 100 м загасання ЛВ у тумані досягає 170 дБ/км для 780 нм (ближній ІЧ спектр) та 320 дБ/км для 555 нм (зелений спектр). Сучасні АОЛЗ мають енергетичний запас 60 дБ. У дощову погоду АОЛЗ працюють краще, ніж радіорелейні лінії зв'язку (РРЛЗ), що використовують радіодіапазон 18-64 ГГц. «Сильна злива» (рівень опадів 75 мм/год) не заважає ЛВ передавати дані на відстані до 1.5 км та зі швидкістю до 1 Гбіт/с, тоді як у каналах зв'язку на основі РРЛЗ швидкість передачі даних може впасти до кількох мегабіт за секунду.

Таким чином, технологія, за якою розроблено АОЛЗ, заснована на передачі даних у оптичному діапазоні через атмосферу. Верхня межа радіоспектра, на яку необхідно отримувати дозвіл на його використання, - 400 ГГц. Частоти, використовувані у АОЛЗ,

на три порядки вищі. Тому, використання обладнання АОЛЗ не потребує жодних проектних, узгоджувальних, дозвільних заходів, зокрема й оплати використання радіочастотного спектра. Таке використання обладнання є одним із найважливіших чинників на користь застосування АОЛЗ та обладнання у телекомунікаційних системах.

Запропоновано метод передачі даних у АОЛЗ, сутність роботи якого полягає у наступному [4-7].

АОЛЗ основана на використанні ЛВ з синхронізацією поздовжніх мод та організується за з'єднанням типу «точка-точка» за парою ідентичних лазерних приймально-передавачів (ЛПП). ЛПП розташовані у межах прямої видимості відносно один одного. ЛПП містить: на передавальному боці: лазер з накачкою та синхронізацією поздовжніх мод, пристрій формування каналів (ПФК) передачі даних, модулюючий пристрій (змішувач, ЗМ) та оптичну систему (формуєчу оптику); на прийомному боці: оптичну систему (формуєчу оптику), фотодетектор (ФТД), ширококутовий підсилювач та резонансні підсилювачі, що налаштовані на несучі частоти, і формуєчі канали передачі даних до споживачів.

До складу АОЛЗ входять ЛПП та пристрої, що відповідають за живлення, моніторинг, налаштування та підключення ЛПП до каналотворювального обладнання – приймально-передавального модуля (ППМ) тощо. В основі технології лежить передача даних модульованим ЛВ з синхронізацією поздовжніх мод через атмосферу. У якості передавача використано твердотілий (напівпровідниковий) лазер з одномодовим багаточастотним з синхронізацією поздовжніх мод спектром. ЛВ поступає у ПФК, що виділяє необхідні несучі частоти. На вхід ЛПП надходить електричний інформаційний сигнал, який кодується та модулюється з несучими частотами ЛВ. Формується груповий оптичний сигнал, який відповідає каналам передачі даних (одна несуча частота – один канал). Груповий сигнал фокусується оптичною системою передавача у вузьке ЛВ та передається через атмосферу до споживача. Використання ЛВ з синхронізацією поздовжніх мод у АОЛЗ вимагає накладення на несучу частоту електричного інформаційного сигналу, який містить дані. Модуляція ЛВ – це зміна одного або декількох параметрів випромінювання за заданим законом у просторі та/або у часі. Закон зміни модульованого параметра відповідає даним, що передаються (інформації). Введення даних у ЛВ можливе різними способами. Можливо модулювати сигналом даних (інформаційним) інтенсивність ЛВ, частоту, фазу та поляризацію. Найбільше застосування має амплітудна модуляція через простоту конструкції відповідних пристроїв. Таким чином, формується вихідний груповий комбінований інформаційний оптичний сигнал із заданими параметрами модуляції та вихідною потужністю.

На приймальній стороні оптична система ЛПП фокусує оптичний сигнал на ФТД (високочутливий фотодіод або лавинний діод), який перетворює ЛВ у електричний інформаційний сигнал. При цьому, чим ширша електрична смуга сигналу, тим більша швидкість передачі інформації. Прийнятий інформаційний

сигнал демодулюється та перетворюється на сигнали вихідного інтерфейсу, які надходять на ППМ.

При зовнішньому розміщенні ЛПП можуть встановлюватися на поверхні дахів будівель або стін. ЛПП монтується на спеціальній жорсткій опорі (металевій), що кріпиться до стіни будівлі. Опора забезпечує можливість регулювання кута нахилу та азимута ЛВ. Оскільки ЛВ передається між пунктами зв'язку у атмосфері, то його поширення сильно залежить від метеорологічних умов, від наявності диму, пилу та інших забруднень повітря. Крім того, у атмосфері спостерігаються турбулентні явища, які призводять до флуктуацій показника заломлення середовища, коливань ЛВ та спотворень прийнятого сигналу. Однак, незважаючи на зазначені проблеми, атмосферний лазерний зв'язок виявився цілком надійним на відстані від декількох кілометрів до кількох десятків кілометрів за дотриманням певних умов.

За умови використання одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ та пристрою формування каналів передачі даних у АОЛЗ необхідно визначити дальність дії такої лінії зв'язку від передавача до приймача, який можливо розглядати як дифузно відбивний об'єкт.

Тоді, дальність дії можливо визначити як

$$R = \sqrt[4]{\frac{E_L \cdot S_{об} \cdot d_{np}^2 \cdot \rho_{об} \cdot \tau_{вн} \cdot \tau_{np} \cdot \tau_{nc}}{\pi \cdot \gamma^2 \cdot q \cdot E_{nop}}}, \quad (1)$$

де  $E_L$  – енергія ЛВ лазера-передавача;  $S_{об}$  – площа розсіювання приймача, як дифузно відбивного об'єкту;  $d_{np}$  – діаметр об'єктива приймальної оптичної системи;  $\rho_{об}$  – коефіцієнт відбиття поверхні приймача;  $\tau_{вн}$ ,  $\tau_{np}$  – коефіцієнти пропускання випромінюючого та прийомного оптичних трактів лінії передачі даних відповідно;  $\tau_{nc}$  – коефіцієнт пропускання повітряного середовища у зоні охорони;  $\gamma$  – плоский кут розбіжності ЛВ;  $q$  – відношення сигнал/шум;  $E_{nop}$  – порогова енергія прийнятого інформаційного сигналу, що реєструється фотодетектором (ФТД).

За умови, коли діаметр ЛВ дорівнює (менше) площі ФТД приймача (1), то дальність дії лінії зв'язку можливо визначити за такою формулою:

$$R = \sqrt{\frac{E_L \cdot d_{np}^2 \cdot \rho_{об} \cdot \tau_{вн} \cdot \tau_{np} \cdot \tau_{nc}}{4 \cdot q \cdot E_{nop}}}. \quad (2)$$

За результатами математичного моделювання (1) та (2) отримано відповідні графіки залежностей, що наведено на рис. 1–3. При цьому, припускається, що енергія ЛВ рівномірно розподілена усередині лінії передачі даних та проекція приймача на площину поперечного перерізу має форму кола. Також, необхідно враховувати той факт, що сукупний вплив взаємодії ЛВ з повітряним середовищем при передачі даних по АОЛЗ, яке одночасно є поглинаючим, розсіюючим та випадково неоднорідним середовищем.

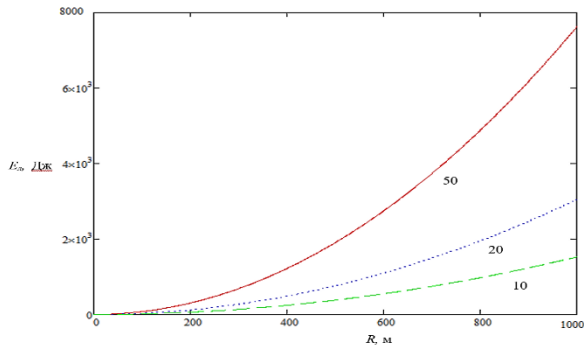
Коефіцієнт пропускання повітряного середовища  $\tau_{nc}$  є функцією дальності  $R$  до приймача, який можливо визначити за такою формулою:

$$\tau_{nc} = \exp(-2\varepsilon \cdot R), \quad (3)$$

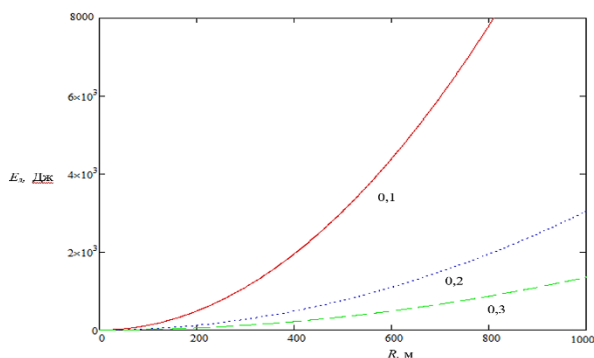
де  $\varepsilon$  – коефіцієнт ослаблення ЛВ у атмосфері, який можливо визначити за емпіричним виразом:

$$\varepsilon = \frac{3,91}{S_M} \cdot \left( \frac{0,55}{\lambda} \right)^{0,585 \sqrt[3]{S_M}}, \quad (4)$$

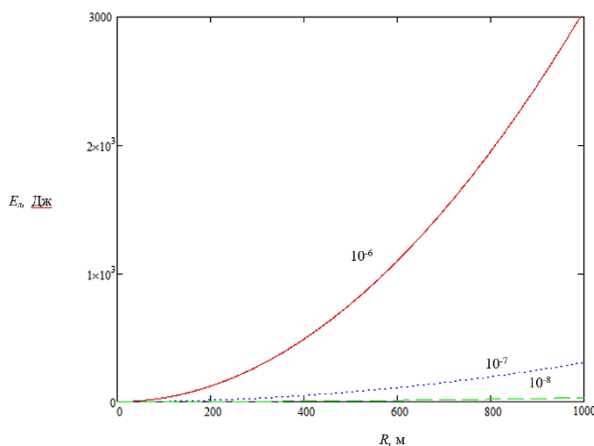
де  $\lambda$  – довжина хвилі зондувального ЛВ;  $S_M$  – метеорологічна дальність бачення від передавача до приймача.



**Рис. 1.** Графік залежності необхідної енергії ЛВ  $E_L$ , що зондує, від дальності  $R$  до приймача при різних значеннях параметру сигнал/шум  $q$ : 10, 20, 50 для значення діаметра об'єкта приймальної оптичної системи  $d_{пр} = 0,2$  м



**Рис. 2.** Графік залежності необхідної енергії ЛВ  $E_L$ , що зондує, від дальності  $R$  до приймача при різних значеннях діаметра об'єкта приймальної оптичної системи  $d_{об}$ : 0,1; 0,2; 0,3 при значенні параметру сигнал/шум  $q = 20$  та об'єкта приймальної оптичної системи  $d_{пр} = 0,2$  м



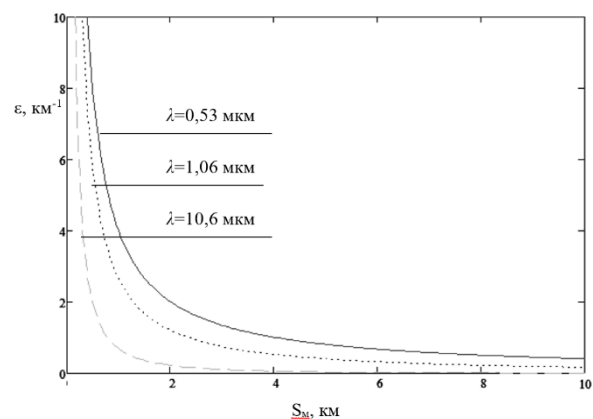
**Рис. 3.** Графік залежності необхідної енергії ЛВ  $E_L$ , що зондує, від дальності  $R$  до приймача при різних значеннях порогової енергії, що реєструється ФТД:  $10^{-8}$ ,  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$  Дж при значенні параметру сигнал/шум  $q = 20$  та об'єкта приймальної оптичної системи  $d_{пр} = 0,2$  м

Таким чином, у загальному вигляді дальність  $R$  до приймача може бути отримана лише методом чисельного рішення локаційного рівняння. Значення  $S_M$  для різних умов застосування передавача з пристроєм формування каналів передачі даних наведено у табл. 1.

**Таблиця 1 – Значення метеорологічної дальності бачення для різних умов**

Погодні умови	Значення $S_M$ , км
Сильний туман, густий сніг	0,05 – 0,5
Слабкий туман, сильна димка, помірний сніг	0,5 – 2
Слабкий сніг, помірний дощ, слабка димка	2 – 10
Слабкий дощ	10 – 20

На основі виразу (4) розраховані залежності коефіцієнту ослаблення ЛВ для різних погодних умов та довжини хвилі ЛВ, рис. 4.



**Рис. 4.** Графік залежності ослаблення ЛВ у повітряному просторі від метеорологічної дальності бачення

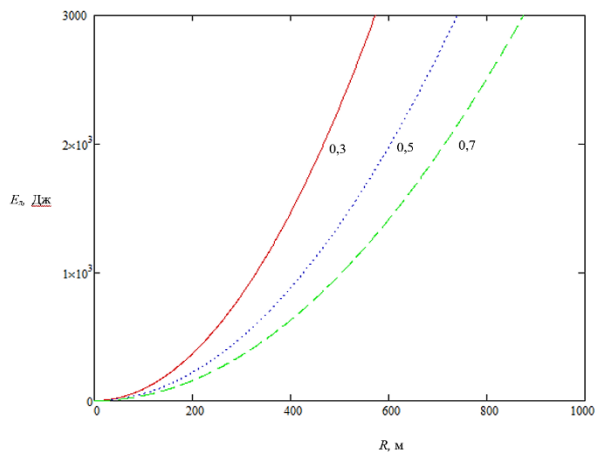
За результатами отриманих залежностей можливо зробити наступні основні висновки: погодні умови можуть вплинути на ослаблення ЛВ у атмосфері; в умовах туману, снігу та димки значення коефіцієнту ослаблення ЛВ значні та складають  $\varepsilon > 2$  км; в умовах слабого дощу ослаблення ЛВ незначне та значення коефіцієнту його ослаблення відповідає  $\varepsilon \leq 0,4$  км<sup>-1</sup>; із зростанням довжини хвилі значення коефіцієнту  $\varepsilon$  зменшуються для однакових погодних умов, на підставі чого можуть формуватися рекомендації щодо передавачів ЛВ, тобто – доцільно використання лазерів-передавачів із максимально можливою довжиною хвилі.

В свою чергу на основі (3) можливо здійснити оцінювання необхідної енергії ЛВ, що зондує, від дальності до приймача для різних погодних умов (туман, сніг тощо), яким відповідають значення  $\tau_{пс}$ : 0,7; 0,5; 0,3 (для довжини хвилі ЛВ, яка складає  $\lambda = 0,53$  мкм), рис. 5 ( $q = 20$ ,  $d_{пр} = 0,2$  м).

## Висновки

До основних переваг використання АОЛЗ можливо віднести наступне:

- швидка організація каналу зв'язку;
- відсутність необхідності отримання дозволів на частоти, які використовуються;



**Рис. 5.** Графік залежності енергії ЛВ  $E_{\text{л}}$ , що зондує, від дальності до приймача для різних погодних умов (туман, сніг тощо), яким відповідають значення  $\tau_{nc}$ : 0,7; 0,5; 0,3 (для довжини хвилі ЛВ, яка складає  $\lambda = 0,53$  мкм)

відсутність впливів сусідніх каналів та електромагнітного шуму;

- відсутність орендної плати за канал;
- високий ступінь безпеки.

Таким чином, отримані результати математичного моделювання дозволяють здійснити оцінювання можливостей передавача ЛВ за різними показниками. При цьому, враховано, наступне:

- втрати ЛВ у оптичній системі передавача становлять 10 %, тобто –  $\tau_{\text{внп}}, \tau_{\text{пр}} = 0,9$ ;
- коефіцієнт відбиття приймача –  $\rho_{\text{об}} = 0,9$ ;
- діаметр об'єктива приймача при існуючих конструкційних обмеженнях –  $d_{\text{пр}} = 0,2$  м;
- порогова енергія прийнятого інформаційного сигналу, що реєструється ФТД приймачем,  $E_{\text{нор}} = 10^{-6}$  Дж (відповідає серійно виготовленим ФТД);
- значення відношення сигнал/шум  $q = 20$ .

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Блаженний Н.В. Постановка задачі структурного синтезу атмосферно-оптичної системи. / Кирпач Л.А., Блаженний Н.В., Голубенко О.І. // Науково-практичний журнал «Зв'язок». К.: ДУТ, 2021. № 3 (2021). С. 22 – 26. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2021.032226>.
2. Толубко В.Б. Підвищення показників якості системи управління послугами мережами майбутнього / В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, Л. П. Крючкова, А. Ю. Ткачов // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. - 2018. - № 3. - С. 5-11. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nzundiz\\_2018\\_3\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nzundiz_2018_3_3).
3. Малик Б. О., Токарева О. В., Малик-Заморій С. Б. Підвищення працездатності оптоволоконних структур в умовах високих рівнів потужності іонізуючого випромінювання. Вопросы атомной науки и техники. 2018. № 2. С. 13-18. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT\\_2018\\_2/article\\_2018\\_2\\_13r.pdf](https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2018_2/article_2018_2_13r.pdf)
4. Сайко В.Г., Казіміренко В.Я., Літвінов Ю.М. Мережі бездротового широкопasmового доступу. – К.: ДУТ, 2015 – 196 с.
5. Mehmet Toy. Cable Networks, Services, and Management. - John Wiley & Sons, 2015. – 376 с. [https://duikt.edu.ua/uploads/1\\_881\\_80314158.pdf](https://duikt.edu.ua/uploads/1_881_80314158.pdf)
6. Розорінов Г. М Соловійов Д.О., Яковенко Л. В. Мережі передавання даних: Напрявні системи оптичного зв'язку. Навчальний посібник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 128 с.
7. Коломійцев О.В. Метод передачі даних у атмосферно-оптичній лінії зв'язку для технології остання миля / О.В. Коломійцев, В.Ф. Третяк, А.М. Катунін, О.В. Філіппенков, В.В. Посохов, О.В. Любченко // Grail of Science. – 2025. – Iss. 51. – С. 606-616. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.18.04.2025.081>.

Received (Надійшла) 21.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.08.2023

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Любченко Олексій Вікторович** – аспірант, кафедра комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

**Oleksii Liubchenko** – PhD student, Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [Oleksii\\_Liubchenko@khi.edu.ua](mailto:Oleksii_Liubchenko@khi.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3077-0316>.

#### Evaluation of data transmission efficiency in an atmospheric-optical communication line based on single-mode multifrequency laser radiation with synchronization of longitudinal modes

Oleksii Liubchenko

**Abstract.** The object of study of this paper is atmospheric-optical communication lines with the organization of data transmission based on single-mode multifrequency synchronized longitudinal laser radiation modes. The aim of this work is to present the results of evaluating the efficiency of data transmission in an atmospheric-optical communication line based on single-mode multifrequency synchronized longitudinal laser radiation modes by various indicators. An atmospheric-optical communication line is proposed, the main elements of which include separation of carrier frequencies from the spectrum of single-mode multi-frequency laser radiation with synchronization of longitudinal modes by means of a channel shaping device that allows the use of separate longitudinal modes; conversion of electrical information signals into a form suitable for modulation with carrier frequencies, followed by their modulation by amplitude, intensity, frequency, phase, or polarization; optical processing and transmission of the group combined optical signal through the communication line to the receiver, where it is focused, converted into an electrical information signal and further processed to extract data and transmitted to consumers. The obtained results of mathematical modeling make it possible to evaluate the capabilities of the laser radiation transmitter by various indicators and indicate that the proposed atmospheric-optical communication line with the organization of data transmission based on single-mode multifrequency with pulse synchronization.

**Keywords:** data transmission, atmospheric-optical communication line, communication channel, single-mode multifrequency laser radiation, synchronization of longitudinal modes, carrier frequency, electrical information signal.

V. Rossikhin, Y. Tarapata, O. Iashchenko

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

## METHODS OF DATA PROCESSING AND ANALYSIS IN A CORPORATE NETWORK

**Abstract. Relevance.** The relevance of studying methods of data processing and analysis in corporate networks is driven by the rapid development of information technologies, the growing volume of corporate data, and the need for prompt and accurate analysis to support effective decision-making. The importance of such methods is also linked to the challenges of ensuring cybersecurity in corporate networks, particularly the protection of information at all stages of its processing and transmission. The quality of the technologies and methods applied to data handling affects a company's performance, competitiveness, and ability to adapt to rapidly changing market conditions. Therefore, systematizing knowledge about the most effective methods of working with corporate data remains a relevant task for both modern science and practical applications. **The object of research** is data processing processes within corporate networks, including the collection, transmission, storage, filtering, analysis, and protection of information circulating within the information and communication infrastructure of a modern enterprise. These processes are considered in the context of their impact on the efficiency of the corporate information system, data security, support for managerial decision-making, and integration with analytical and cloud platforms. **Purpose of the article** is to investigate the main stages and methods of data processing and analysis in the corporate environment, including data collection, preprocessing, storage, analytical evaluation, and information security, as well as to analyze modern tools and platforms that ensure efficient and secure data handling at the scale of a large organization. **Research results.** During the study, a comprehensive analysis of the stages and methods of data processing in the corporate environment was conducted. A systemic model of the corporate data lifecycle was established, covering all key stages – collection, preprocessing, storage, analytics, and protection. Each of these stages requires the application of a specific class of technologies and presents its own implementation challenges. Tools for data collection and preprocessing were classified, with ETL processes, logging, aggregation technologies, sampling, and normalization playing an important role in ensuring data cleanliness and suitability for further analysis. Modern data storage platforms were analyzed, including cloud-based (Azure, AWS, GCP) and on-premises solutions. The effectiveness of using OLAP and machine learning in analytical processing was evaluated. The role of information security in corporate networks was addressed. The necessity of implementing cryptographic protection, access control, as well as anonymization and masking mechanisms was demonstrated as a response to the risks of data loss or compromise. **Conclusions.** Modern methods of data processing in corporate networks have been examined, covering the stages of data collection, preprocessing, storage, analytics, and information security. It has been established that effective data management is achievable only through a comprehensive approach that combines technical tools, software platforms, and security policies. Particular attention was given to the use of cloud technologies, ETL tools, OLAP analytics, and machine learning algorithms. The importance of cryptographic protection, anonymization, and access control was emphasized. The obtained results can be applied to improve the efficiency of enterprise information systems and to implement analytical solutions in business practice.

**Keywords:** corporate network, data processing, ETL, cloud technologies, data storage, OLAP, machine learning, information security, anonymization, cryptography, analytics, Big Data.

### Introduction

In the current context of business digital transformation, corporate networks have become a key environment for the generation, transmission, storage, and processing of information. They serve not only as a communication tool between individual departments of an organization, but also as a foundation for building integrated information systems that support business process automation, decision-making, and increased competitiveness. The constant growth in the volume of data circulating within corporate networks generates the need for efficient, scalable, and secure methods of data processing. Modern corporate networks are characterized by complex architectures, heterogeneity of data sources, and the necessity to handle various types of data – from numerical tables and logs to unstructured text, images, and streaming sensor data. In such conditions, effective information flow management requires the implementation of specialized technologies at every stage of the data lifecycle: from collection and preliminary cleaning to analytical processing, visualization, and protection.

A critical component of this process is data preprocessing, which ensures the quality of information

for further analysis. Methods such as normalization, aggregation, filtering, and compression enable the adaptation of data streams to the requirements of computing platforms. Additionally, at the data storage stage, the choice of appropriate infrastructure (on-premises, cloud, or hybrid) and the assurance of data availability and integrity are of fundamental importance.

Analytical processing tools play a crucial role in corporate information systems, including OLAP models [1], Data Mining technologies [2], and modern machine learning methods [3], which not only analyze large volumes of data but also identify patterns, generate forecasts, and support well-founded managerial decisions. Therefore, considerable attention is also given to platforms that support such processes, as well as to cloud-based analytics tools.

Equally important is the issue of data processing security – encryption, masking, anonymization, and access control has become integral components of corporate system architecture, as data loss or compromise may have critical consequences for an organization.

Thus, the article examines key approaches to data processing in corporate networks, systematizes the methods and tools used at all stages of the information

lifecycle, and explores ways to improve the efficiency and security of working with corporate data in large-scale information environments.

#### **Analysis of Recent Research and Publications.**

Recent research highlights that effective data processing within corporate networks is critically important for modern organizations. Real-time data processing, the use of cloud technologies, process optimization, and the provision of reliable network communication are key aspects in achieving competitive advantages. At the same time, the implementation of these technologies is accompanied by challenges such as data security, the integration of heterogeneous sources, and resource management, which require further study and the development of effective strategies. Article [4] explores the impact of real-time data processing on the timeliness of business decision-making. It examines technologies such as Apache Kafka, Apache Flink, Google Cloud Dataflow, and Spark Streaming, which enable companies to respond quickly to market changes, optimize operations, and improve customer service. The study also analyzes implementation challenges, including data integration, scalability, data quality, and security. Article [5] focuses on factors affecting data processing efficiency, such as volume, variety, velocity, and veracity. It examines optimization techniques, including hardware improvements, software innovations, and architectural approaches such as distributed computing and cloud solutions. Special attention is given to the processing of unstructured data, integration of heterogeneous sources, and the assurance of energy efficiency and data confidentiality. Article [6] analyzes the use of cloud technologies for processing large volumes of industrial data. It discusses the advantages of cloud platforms in ensuring efficiency, security, and cost-effectiveness of data processing, as well as challenges related to data security, confidentiality protection, performance, and scalability. The study also considers the potential for integrating artificial intelligence and machine learning in this domain. Article [7] addresses the impact of modern technologies such as hyper automation, process mining, and predictive monitoring on business process management. It emphasizes the importance of integrating data from various sources to optimize processes and support well-informed decision-making. Article [8] presents a method for predictive resource allocation in networks supported by Multi-Access Edge Computing, aimed at ensuring the required quality of service. The study highlights the importance of effective resource management to guarantee reliable data processing in corporate networks.

**The purpose of this work** is to investigate data processing methods in corporate networks, with a focus on technological solutions that ensure efficient data collection, preprocessing, storage, analysis, and protection.

### **Main part**

In the current conditions of global digitalization, the corporate network serves not only as a channel for information transmission, but also as a full-fledged information and communication environment forming the foundation of an organization's internal and external

interactions. Corporate networks are the primary environment for collecting, routing, storing, and processing critical information related to production processes, financial activities, customer bases, marketing strategies, and more.

Corporate networks are typically built on a multi-level architecture that includes local, wide area, and virtual private networks. The main goal of such a structure is to provide stable access to information resources regardless of the user's physical location. The architecture of a corporate network may be centralized (with a single data center) or distributed (with multiple computing nodes). The data circulating within corporate networks is highly diverse in both structure and origin. It can be broadly categorized as structured, unstructured, or semi-structured. In addition, data may be historical, operational or streaming, which requires different processing approaches depending on the context of use.

Information flows in corporate networks are divided into internal (between departments, servers, internal users) and external (interactions with clients, suppliers, cloud services). Each type of flow has specific requirements in terms of transmission latency, reliability and fault tolerance, scalability, and security. Processing such flows requires the use of complex routing protocols, traffic monitoring tools, intelligent load balancing systems, and the application of access control and encryption policies. Given the growing number of devices and services, corporate networks are increasingly integrating cloud solutions, edge computing, and Internet of Things (IoT) components [9], which expand the possibilities for data collection and processing directly at the network edge. The initial stage of corporate data processing is crucial for subsequent analytics, as it is at this stage that the raw data sets are formed, determining the quality of analytical insights, the accuracy of forecasts, and the effectiveness of decision-making. Data collection and preprocessing approaches include a range of technical and logical processes aimed at transforming unstructured or raw data streams into structured, clean, and analysis-ready formats.

In a corporate environment, data may originate from a wide variety of sources: software systems, internal registers, event logs, API requests, IoT device sensors, network traffic, or external information systems. To integrate such heterogeneous streams, the following technologies are used: event and transaction logging, ETL processes, integration platforms, and streaming technologies. Data collection must meet criteria for reliability, accuracy, and completeness, while also accounting for the format and semantics of the source.

After the collection stage, the data often contain duplicates, missing values, logical inconsistencies, or input errors. Preprocessing involves data cleaning, normalization, standardization, type conversion, and filtering. These procedures are implemented using SQL queries, data processing languages, and specialized environments such as KNIME, RapidMiner, and SAS.

To ensure the scalability of corporate data storage and reduce storage costs, a variety of methods are widely used: compression algorithms to minimize the volume of stored data without losing integrity; aggregation for

analytical purposes; sampling to reduce computational load; and window aggregation for analyzing metric changes over time intervals. Compression and

aggregation help reduce the load on storage and processing systems and accelerate query execution for databases or analytical modules.

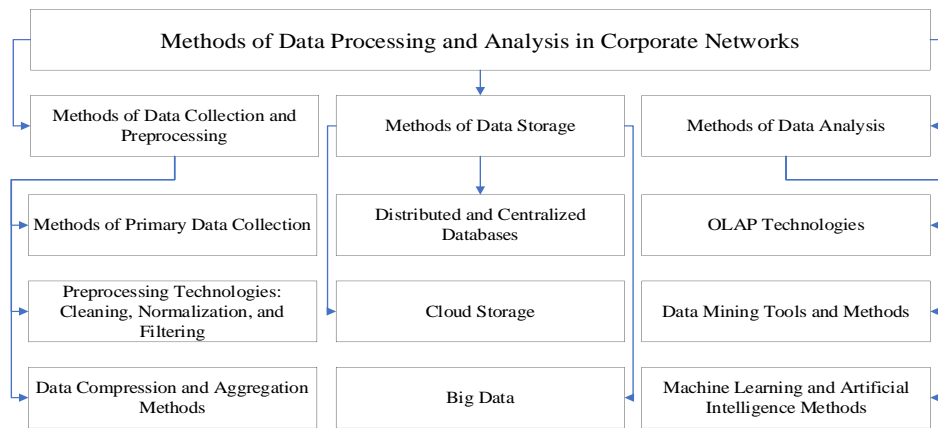


Fig. 1. Methods of Data Processing and Analysis in Corporate Networks

Data storage is one of the key stages in the information lifecycle within corporate networks. It is in storage systems where data is accumulated, organized, and structured for subsequent access, analysis, and use in business processes. In the context of modern companies, data storage encompasses not only the physical placement of information on servers but also concepts of logical organization, dynamic scalability, availability, and security. There are two primary approaches to database architecture in corporate environments: centralized and distributed. Centralized databases involve storing all data in a single data center or server repository. This simplifies administration and backup, but it scales poorly and is vulnerable to hardware failures. Distributed databases allow information to be stored across multiple nodes within the corporate network. They provide high fault tolerance, load balancing, and fast access to information in geographically distributed offices, but require more complex mechanisms for consistency (consensus) and replication. The choice between these models depends on data volume, access time requirements, risk levels, and existing IT infrastructure. Cloud storage has become an integral part of corporate infrastructure due to its high flexibility, scalability, and reduced hardware costs. Leading platforms offer automatic scaling based on data volume, high availability, integration with analytical and machine learning services, and support for access policies, encryption, version control, and logging. Hybrid models allow companies to store confidential or critical data locally, while hosting less sensitive information in the cloud—optimizing costs while maintaining control over data. Corporate systems increasingly operate with Big Data arrays. Traditional database management systems are insufficient for their efficient storage and processing, prompting the use of file systems for distributed environments, NoSQL solutions, and unified repositories for structured and unstructured data with flexible processing capabilities. A distinctive feature of Big Data storage is support for parallel processing, decentralized access management, protection against data loss through replication, and fast horizontal scalability. Once corporate data is collected, preprocessed, and stored, the next key

stage is analytical processing, which involves identifying patterns, building decision-making models, and supporting strategic planning. In the modern corporate environment, analytics goes far beyond traditional reporting. It has evolved into a comprehensive data intelligence system combining classical statistical methods with machine learning and artificial intelligence algorithms.

Online Analytical Processing (OLAP) enables interactive exploration of large volumes of data across multiple dimensions. Its main advantages include quick access to aggregated indicators, category-based analytics, and operations that allow users to drill down or roll up information. OLAP systems are widely used in management accounting, financial planning, and marketing analysis. They require preprocessed, structured data and typically support regular reporting. For more complex analytical tasks, machine learning and artificial intelligence algorithms are increasingly applied. These techniques model non-linear dependencies, handle unstructured data, enable predictive analytics, and even support automated decision-making. Typical use cases for machine learning in corporate environments include demand forecasting and supply chain optimization; risk assessment in banking and insurance; personalization of marketing campaigns; sentiment analysis based on customer reviews or social media; automatic document classification; and recommendation systems. In corporate settings, effective data processing requires not only appropriate methods but also powerful tools that can scale, integrate with various sources, automate processes, and ensure the reliability of results. Depending on their objectives, companies use both universal platforms and specialized solutions for ETL, analytics, storage, or visualization. ETL is a core mechanism for preparing data for analysis. Its main function is to extract data from various sources, transform it into the appropriate format, and load it into a data warehouse. Among the most popular ETL tools are Apache NiFi, Talend, Microsoft SQL Server Integration Services, Pentaho Data Integration, and Airflow. These tools automate data collection and transformation, reduce the workload on IT departments, and ensure data consistency across storage systems.

Analytical platforms enable the creation of dynamic reports, dashboards, visualizations, and automated analytical models. ERP and CRM platforms also include built-in analytical functions, allowing the integration of planning, accounting, customer interaction, and analytics processes within a unified environment.

Table 1 presents the key capabilities of three cloud platforms: Microsoft Azure, AWS, and Google Cloud.

Table 1 – Comparative Analysis of Models

Characteristic	Microsoft Azure	Amazon Web Services	Google Cloud Platform
Core Services	Azure Synapse, Data Factory, ML Studio	Redshift, Glue, SageMaker	BigQuery, Dataflow, Vertex AI
Big Data Analytics	Integration with Power BI, support Data Lake	Powerful toolset for Data Lakehouse	Vertex AI, AutoML Tables, TensorFlow
Machine Learning	Platform AutoML, Azure ML Designer	SageMaker SageMaker with advanced customization	Vertex AI, AutoML Tables, TensorFlow
Programming Language Support	Python, R, SQL, .NET	Python, Scala, Java, SQL	Python, SQL, TensorFlow
Security	Azure Active Directory, Encryption, RBAC	IAM, KMS, DLP	Identity and Access Management, Data Loss Prevention

Each of the platforms has its own specialization: Azure offers close integration with office products, AWS provides flexibility and scalability, and GCP is optimized for analytics and artificial intelligence.

It is also important to mention the issue of ensuring data security in corporate networks, as the constant growth in the volume of information circulating within corporate systems makes information security a matter of primary importance. Data is a strategic asset of an enterprise, and its loss, modification, or unauthorized access can lead to significant financial, reputational, and legal consequences. Therefore, at all stages of the data lifecycle – from collection to archiving – reliable protection measures must be implemented in accordance with the internal policies of the organization and international standards. A comprehensive approach to security requires implementing protection at every stage of data processing: at the collection stage, this includes the use of secure transmission protocols, authentication of data sources, and client-side encryption; at the processing stage, this involves isolation of processing environments, access control to computing resources, and logging of data operations; at the storage stage, encryption at the disk level, access control to file systems, backup, and data retention policies are applied.

The integration of cryptographic mechanisms into software and network protocols allows information to be protected even in the event of physical access to storage media or traffic interception. In addition to encryption, methods for restricting access to personal or confidential information are increasingly applied, including data masking, anonymization, pseudonymization, and differential privacy. These methods make it possible to comply with legislation on the protection of personal data while maintaining the analytical value of the data.

## Conclusions

As a result of the conducted research, it has been established that effective data processing in corporate networks is a critically important prerequisite for the stable functioning of information systems, strategic enterprise management, and ensuring competitiveness under conditions of digital transformation. The examined structure of data processing methods covers the entire data lifecycle – from the moment of collection to the final stages of analytical use and protection.

The effectiveness of data collection and preprocessing within corporate networks determines the subsequent quality of all information analytics. Proper implementation of these stages allows for increased accuracy of models, minimized risk of erroneous conclusions, and preservation of data integrity within the corporate environment. Efficient data storage is also a vital condition for ensuring the stable operation of the information infrastructure. Modern approaches to storage organization enable flexible adaptation of corporate storage systems to business needs and provide a reliable foundation for analytical data processing.

Proper implementation allows not only for assessing the current situation in a company but also for projecting its future development, adapting strategies to market changes based on evidence-driven data. Modern tools and platforms for data processing offer enterprises a broad range of technologies for tasks of any scale. Effective use of these tools significantly improves the quality of management, reduces the time required for analytical operations, and enables rapid responses to market dynamics.

At the same time, ensuring the security of data processing requires a systematic approach that includes technical, organizational, and procedural measures. A well-considered combination of classical protection methods – encryption, access control, and authentication – with modern practices such as anonymization, machine-based incident monitoring, and continuous auditing allows organizations to minimize the risks of data leaks, manipulations, and privacy violations within a complex and dynamic corporate environment.

## REFERENCES

1. U. Sirin, A. Ailamaki. Micro-architectural Analysis of OLAP: Limitations and Opportunities. Cornell University, 2019. 13 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.04718>
2. Wu, W.-T., Li, Y.-J., Feng, A.-Z., et al. Data mining in clinical big data: the frequently used databases, steps, and methodological models. Military Medical Research, 8(1), 2021. 44 p. <https://doi.org/10.1186/s40779-021-00338-z>
3. Flach P. A. Machine Learning: The Art and Science of Algorithms that Makes Sense of Data. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 291 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511973000>
4. M, Achanta. The Impact of Real - Time Data Processing on Business Decision - making." International Journal of Science and Research (IJSR), vol. 13, no. 7, 2024, pp. 400-404, <https://www.doi.org/10.21275/SR24708033511>

5. R.Abu-Zaid, A.Hammad. Streamlining Data Processing Efficiency in Large-Scale Applications: Proven Strategies for Optimizing Performance, Scalability, and Resource Utilization in Distributed Architectures. International Journal of Machine Intelligence for Smart Applications, 14(8), 2024. P. 31-49. <https://dljournals.com/index.php/IJMISA/article/view/27>.
6. Ziyang Yao. Application of cloud computing platform in industrial big data processing. Penn State University, 2024. 8 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.09491>
7. L. Ackermann, M. Käppel, L. Marcus, L. Moder, et al. Recent Advances in Data-Driven Business Process Management. Cornell University, 2024. 34 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.01786>
8. W. Symbor, L. Falas. Ensuring Reliable Network Communication and Data Processing in Internet of Things Systems with Prediction-Based Resource Allocation, MDPI Sensors. Vol. 25, iss. 1, 2025. 33 p. <https://doi.org/10.3390/s25010247>
9. O. Aouedi, T. Vu, A. Sacco, D. Nguyen, K. Piamrat, G. Marchetto, Q. Pham. A Survey on Intelligent Internet of Things: Applications, Security, Privacy, and Future Directions. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024. 56 p. <https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3430368>

Received (Надійшла) 28.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.08.2025

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Россіхін Василь Васильович** – доктор юридичних наук, проректор з інноваційно-корпоративної роботи та адміністрування, професор кафедри філософії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Vasyl Rossikhin** – Doctor of Law, Vice-Rector for Innovative Corporate Work and Administration, Professor of Philosophy Department, Kharkiv National University of Radio Electronics Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [vasyl.rossikhin@nure.ua](mailto:vasyl.rossikhin@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0003-3423-8896>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57207769187>.

**Тарапата Ярослав Ігорович** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Yaroslav Tarapata** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics Ukraine;

e-mail: [yaroslav.tarapata@nure.ua](mailto:yaroslav.tarapata@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0008-4691-260X>.

**Ященко Олександр Миколайович** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Oleksandr Iashchenko** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [oleksandr.iashchenko1@nure.ua](mailto:oleksandr.iashchenko1@nure.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0007-1033-365X>.

#### Методи обробки та аналізу даних в корпоративній мережі

В. В. Россіхін, Я. І. Тарапата, О. М. Ященко

**Анотація. Актуальність.** Актуальність теми дослідження методів обробки та аналізу даних у корпоративних мережах зумовлена швидким розвитком інформаційних технологій, зростанням обсягів корпоративної інформації та необхідністю оперативного й точного аналізу для ефективного прийняття рішень. Важливість дослідження таких методів також пов'язана з викликами щодо забезпечення кібербезпеки корпоративних мереж, зокрема захисту інформації на всіх етапах її обробки та передачі. Від якості застосованих технологій та методів роботи з даними залежить продуктивність компанії, її конкурентоспроможність та здатність адаптуватися до швидко змінюваних умов ринку. Тому систематизація знань про найбільш ефективні методи роботи з корпоративними даними є актуальним завданням сучасної науки та практики. **Об'єкт дослідження:** процеси обробки даних у корпоративних мережах, що включають збір, передавання, зберігання, фільтрацію, аналіз та захист інформації, яка циркулює в межах інформаційно-комунікаційної інфраструктури сучасного підприємства. Ці процеси розглядаються в контексті їх впливу на ефективність функціонування корпоративної інформаційної системи, забезпечення безпеки даних, підтримку управлінських рішень та інтеграцію з аналітичними й хмарними платформами. **Мета статті:** дослідження основних етапів та методів обробки та аналізу даних у корпоративному середовищі, які включають збір, попередню обробку, зберігання, аналітичний аналіз та захист інформації, а також аналіз сучасних інструментів та платформ, що забезпечують ефективну й безпечну роботу з даними в масштабах великої організації. **Результати дослідження.** У ході дослідження було здійснено комплексний аналіз етапів і методів обробки даних у корпоративному середовищі. Встановлено системну модель життєвого циклу корпоративних даних, яка охоплює всі ключові стадії – збір, попередню обробку, зберігання, аналітику та захист. Кожен із цих етапів вимагає застосування окремого класу технологій і має власні виклики у реалізації. Класифіковано інструменти збору й попередньої підготовки даних, серед яких важливу роль відіграють ETL-процеси, логування, технології агрегації, семплінгу та нормалізації, що забезпечують чистоту й придатність даних до подальшого аналізу. Проаналізовано сучасні платформи зберігання даних, включно з хмарними (Azure, AWS, GCP) та локальними рішеннями. Оцінено ефективність використання OLAP та машинного навчання в аналітичній обробці. Розкрито роль інформаційної безпеки в корпоративних мережах. Доведено необхідність впровадження криптографічного захисту, контролю доступу, а також механізмів анонімізації та маскування як відповідь на ризики втрати або компрометації даних. **Висновки.** розглянуто сучасні методи обробки даних у корпоративних мережах, що охоплюють етапи збору, попередньої обробки, зберігання, аналітики та захисту інформації. Встановлено, що ефективне управління даними можливе лише за умови комплексного підходу, який поєднує технічні засоби, програмні платформи та політики безпеки. Особливу увагу приділено використанню хмарних технологій, інструментів ETL, OLAP-аналітики та алгоритмів машинного навчання. Підкреслено важливість криптографічного захисту, анонімізації та контролю доступу. Отримані результати можуть бути використані для підвищення ефективності роботи інформаційних систем підприємств і впровадження аналітичних рішень у бізнес-практику.

**Ключові слова** корпоративна мережа, обробка даних, ETL, хмарні технології, зберігання інформації, OLAP, машинне навчання, інформаційна безпека, анонімізація, криптографія, аналітика, Big Data.

Oleksandr Shefer, Oleksandr Yevdochenko

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE FIRE CODE FOR COMBATING SHORT PULSE INTERFERENCE

**Abstract. Relevance.** In modern telecommunications networks, it is extremely important to effectively protect information from short impulse noise, which can cause local packet errors. Such noise is particularly characteristic of environments with high levels of electromagnetic noise (e.g., IoT, power cables, satellite communications). To counteract such types of failures, it is advisable to use specialized codes, in particular the Fire code, which has a high ability to detect and correct sequential bit errors of fixed length. **Research object:** the Fire code in data transmission systems with impulse interference. **Purpose of the article:** to analyze the effectiveness and study the Fire code, optimize and improve the code's effectiveness using the proposed methods of generating polynomial optimization, hybrid coding, adaptive coding, and parallel processing. **Research results.** The article proposes and tests methods for improving the efficiency of the Fire code in conditions of impulse noise. A comparison of the probability of correct decoding for different methods was carried out. A comparison of processing delay and computational complexity was performed. The results of the analysis clearly demonstrate the advantages of the proposed methods for optimizing the Fire code, confirming their effectiveness in increasing the probability of correct decoding and reducing processing delay. The proposed methods were implemented in a prototype data transmission system. The results showed a reduction in the probability of decoding errors to 35% compared to the baseline code. **Conclusions.** Analysis of the Fire code confirmed its effectiveness in combating short impulse noise, but revealed limitations at high noise intensities and high computational complexity. The proposed optimization methods significantly improved the code's performance. The improved Fire code provides increased noise immunity in telecommunications networks, which allows it to be recommended for use in networks with strict transmission quality requirements.

**Keywords:** Fire code; noise resistance; correction properties; redundancy; processing delay; computational complexity.

### Introduction

**Statement of the scientific problem.** One of the key challenges in modern telecommunications systems is ensuring reliable transmission of information in unstable communication channels, especially in the presence of short-term impulse noise. Unlike uniformly distributed random errors, impulse noise tends to group errors into series that can completely damage consecutive bits or even entire data blocks [1, 2]. This characteristic of disturbances makes it impossible to correct them effectively using classical block or convolutional codes without a significant increase in redundancy.

The problem is particularly acute in systems with stringent requirements for latency, power consumption, and computational complexity, such as unmanned platforms, sensor networks, military telecommunications complexes, and critical infrastructure systems [3]. In such cases, excessive complication of data protection measures is unacceptable, and the use of codes with high redundancy contradicts the requirements for speed and throughput.

The Fire code, which belongs to the class of combined codes with the ability to effectively correct serial errors, offers promising opportunities for use in conditions of impulse noise. Its structure combines the properties of convolutional codes and cyclic redundancy check (CRC), allowing a compromise between implementation complexity and error correction efficiency [4, 5]. However, the classic parameters of the Fire code are not always optimal in conditions of short intense pulses characteristic of practical telecommunication channels [6].

The lack of adaptation of the code structure to the statistical characteristics of the channel, as well as the use of rigid decoding methods without taking into account the probabilistic nature of errors, limits the effectiveness of the Fire code. Thus, there is a need to develop methods

for modifying the parameters of this code in order to increase its noise immunity while maintaining moderate computational complexity.

The relevance of solving this problem is determined by the need to improve the reliability of data transmission in real radio channel conditions containing short impulse noise, while simultaneously complying with the requirements for resource-efficient processing. The proposed improvement of the Fire code aims to implement structural and algorithmic changes aimed at improving coding efficiency without significantly complicating hardware or software implementation.

**Analysis of recent studies and publications.** The problem of protecting information from interference in telecommunications systems for various purposes has been actively researched over the past decades. Particular attention is paid to effective error correction methods that can ensure reliable data transmission in conditions of limited computing and energy resources. In classic works devoted to coding theory, such as [5–7], the basic principles of constructing block and convolutional codes, their characteristics, and efficiency criteria are formulated. At the same time, most of them are focused on random (independent) errors and do not always work adequately in conditions of short pulse interference.

In [2, 8], modifications of correction codes for memory channels were investigated, in particular for Gilbert–Elliott models, which describe channels with impulse noise well. However, the implementation of most of these methods is associated with the complication of decoding algorithms, which makes it impossible to use them in real-time systems or devices with limited resources.

Of particular interest are combined codes, in particular the Fire code proposed in [4]. It is an example of a cyclic code with the ability to effectively correct

serial errors by combining CRC control with linear recurrent connections. Classic publications such as [5], [6] describe the structure and mathematical apparatus for constructing the Fire code. Its application has been considered mainly in magnetic recording systems, but in recent years there has been growing interest in the use of this code in telecommunications, particularly in conditions of short pulse interference.

Works [3, 9] provide an overview of lightweight codes adapted for devices with limited resources (sensor networks, IoT, etc.), but most of them do not provide sufficient resistance to serial interference. At the same time, [9] investigates the effectiveness of using the Fire code in combination with soft decoding methods, which allows partially compensating for the effect of interference without significantly increasing complexity.

In the context of Ukrainian scientific research, it is worth noting the works [10, 11], which consider approaches to constructing combined and compound codes to improve the noise immunity of telecommunications systems. Separately, [12] analyzes the effectiveness of structural modifications of convolutional codes under the influence of clustered impulse noise.

However, there are currently no comprehensive studies that systematically consider the adaptation of the Fire code structure to the statistical characteristics of short impulse noise using methods for restructuring its parameters and improving decoding algorithms. This article aims to fill this gap.

**The purpose of this work** is to improve the efficiency of using the Fire code in telecommunication systems operating under conditions of short-term impulse interference. The main focus is on developing approaches to adaptive modification of the code structure and improving decoding algorithms in order to improve noise immunity, maintain low redundancy, and ensure a moderate level of computational complexity.

### Presentation of the main material and substantiation of the obtained research results

The Fire code is a type of block code with a cyclic structure designed for the efficient detection and correction of fixed-length packet (sequential) errors. The code is optimized for correcting packet errors of length

no more than  $b$ . Its construction is based on the product of two polynomials [13]:

$$g(x) = (x^b + 1) \cdot p(x), \quad (1)$$

where  $x^b + 1$  - a binomial that allows detecting and correcting group errors of length up to  $b$ ,  $p(x)$  - an irreducible polynomial, usually of degree 1 or 2, to ensure the check distance.

The cyclic nature of the code allows encoding and decoding to be implemented based on shift registers, which significantly reduces hardware complexity.

Let us consider the correction properties and parameters. The main characteristics of the Fire code are:

- code word length:  $n=2m-1$ ;
- number of information bits:  $k=n-r$ , where  $r$  is the degree of the generating polynomial;
- ability to correct a single packet of errors with a length of no more than  $b$ ;
- minimum distance  $d_{min} \geq b+1$ .

The Fire code is capable of detecting up to  $d_{min} - 1$  arbitrary errors (not necessarily consecutive) and correcting one packet up to  $b$  in length, or simultaneously detecting one packet of errors and one single error under certain conditions.

The Fire code is capable of detecting not only single errors, but also multiple errors. Although the Fire code guarantees the correction of only one packet of length  $\leq b$ , it can also detect a larger number of errors, in particular two or more errors if they are separated (not part of the same packet), as well as combinations of single and packet errors if their total length does not exceed the detection limit. This is ensured because the polynomial  $x^b + 1$  is not a divisor of any arbitrary error packet of length  $\leq b$ , which makes the syndrome unknown. Thus, the interfering effect is detected but not corrected.

Due to the cyclic nature of the Fire code [4], it is capable of detecting and correcting errors regardless of their location in the code word. Cyclic shifting does not change the code structure, and the generating polynomial remains invariant to the packet position.

Let's compare the Fire code with classical codes. The results of the comparison are shown in Table 1.

For example, let's take  $b=4$  and  $p(x)=x+1$ , then the generating polynomial will look like this:

$$g(x) = (x^4 + 1)(x + 1) = x^5 + x + 1. \quad (2)$$

Table 1 - Comparison with classic codes

Characteristics	Fire code	BCH code	CRC
Correction object	1 packet of length $\leq b$	$t$ arbitrary bit errors	Error detection only
Minimum distance	$\geq b + 1$	$\geq 2t + 1$	Depends on the polynomial
Redundancy	Depends on $b$	Depends on $t, m$	Usually 16-32 bits
Implementation complexity	Low	Medium	Very low
Adaptability to packet interference	High	Low / limited	Low

Тоді  $r=5$ , і при  $n=15$  отримуємо  $k=10$ , тобто код (15, 10,  $d_{min} \geq 5$ ).

Based on the result obtained, the code corrects 1 error packet up to 4 bits long. Let us analyze the code

parameters depending on the length of the correction packet  $b$ .

The results of the analysis are presented in Table 2.

Table 2 - Fire code parameters depending on packet length

Maximum packet length, $b$	Generating polynomial, $g(x)$	Redundancy, $r$
2	$(x^2 + 1)(x + 1) = x^2 + x + 1$	3
3	$(x^3 + 1)(x + 1) = x^4 + x + 1$	4
4	$(x^4 + 1)(x + 1) = x^5 + x + 1$	5
5	$(x^5 + 1)(x + 1) = x^6 + x + 1$	6
6	$(x^6 + 1)(x + 1) = x^7 + x + 1$	7

Let's plot a graph of redundancy  $r$  versus packet length  $b$ , as shown in Fig. 1. The graph shows that redundancy increases linearly with the maximum length of the correction packet. This allows you to flexibly configure the Fire code for specific channel characteristics, ensuring effective correction at minimal cost.

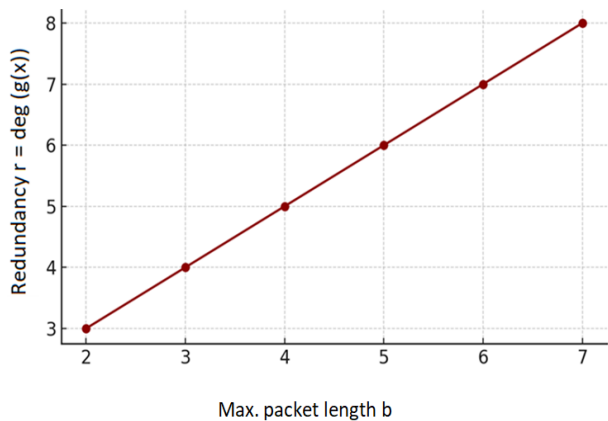


Fig. 1. Dependence of redundancy  $r$  on the length of the correction packet  $b$

The effectiveness of the Fire code was investigated by modeling under transmission channel conditions subject to short impulse noise typical for industrial and military telecommunications environments [2], [8]. Impulse noise in the model was set as a series of consecutive errors lasting from 5 to 10 bits with a frequency of  $10^{-3}$  to  $10^{-2}$  per bit.

Main analysis metrics:

- probability of correct decoding ( $P_{correct}$ ): the ratio of correctly decoded words to the total number;
- computational complexity: the number of operations for encoding and decoding;
- redundancy: the ratio  $(n - k)/n$ ;
- processing delay: the time required for encoding and decoding.

The simulation results showed that for a code with  $n=31, k=21$ :

- at an error rate of  $10^{-3}$  and an interference duration of up to 5 bits,  $P_{correct} = 98,7\%$ ;
- at an interference duration of 10 bits or an error rate of  $10^{-2}$ , the probability decreases to  $92,3\%$ ;

- the computational complexity of decoding using the Berlekamp-Messy algorithm [5] is  $O(n^2)$ , which may be a limitation for real-time systems;

- the redundancy of the code is  $\frac{(32-31)}{31} \approx 32,3\%$ , which is acceptable for many applications, but can be reduced to improve efficiency.

Limitations of the Fire code include reduced efficiency at high interference intensities and significant computational complexity for large  $n$ .

To improve the effectiveness of the Fire code in conditions of impulse noise, the following methods were tested:

**1. Optimization of the generating polynomial.**

Selecting a polynomial  $g(x)$  with better correlation properties allows increasing the code distance and reducing the probability of false decoding.

For example, the polynomial  $g(x)=x^{10}+x^9+x^8+x^6+x^5+x^4+1$  increased  $P_{correct}$  by 1,2% (to 99,9% at an error rate of  $10^{-3}$ ).

**2. Hybrid coding.** The combination of Fire code and Reed-Solomon code provides additional protection against single and packet errors. In the hybrid scheme, the Fire code corrects packet errors, and the Reed-Solomon code corrects single errors. Simulation showed an increase in  $P_{correct}$  to 99,4% with interference lasting up to 10 bits.

**3. Adaptive coding.** An algorithm that adapts to interference characteristics (duration, frequency) reduces computational complexity by 15–20% through dynamic selection of decoding strategies.

For example, when interference intensity is low, the algorithm uses simplified decoding, reducing the number of operations.

**4. Parallel processing.** Implementing the decoder on the GPU (using CUDA) reduced the decoding time by 35% for code with  $n=3$ . This is especially important for real-time systems such as telecommunications or IoT.

The results of the analysis and comparison are shown in Tables 3 and 4. Graphs (Fig. 2 and 3) were constructed based on the analysis and optimization of the Fire code according to the results obtained in the previous analysis, namely the probability of correct decoding  $P_{correct}$ , computational complexity, and processing delay for different optimization methods.

Table 3 – Comparison of the probability of correct decoding  $P_{correct}$  for different methods

Method	$P_{correct}$ (error rate $10^{-3}$ )	$P_{correct}$ (error rate $10^{-2}$ )
Basic Fire code	98,7%	92,3%
Optimized polynomial	99,9%	93,5%
Hybrid coding	99,4%	94,2%
Adaptive coding	99,2%	93,8%
Combination (optimized polynomial + hybrid coding)	99,5%	94,5%

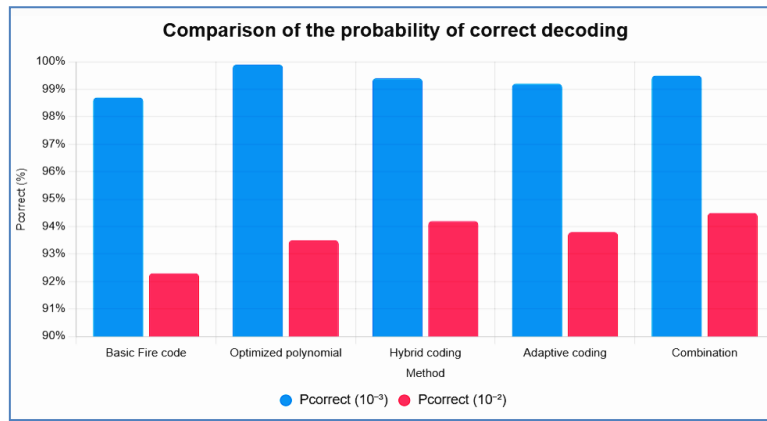


Fig. 2. Probability of correct decoding

Table 4 – Comparison of processing delay and computational complexity

Method	Processing delay, ms	Delay reduction, %	Computational complexity (operations)
Basic Fire code	10,00	0%	$O(n^2)$ (~ 961 for $n = 31$ )
Adaptive coding	8,2	18%	~788
Parallel processing (GPU)	6,5	35%	~961 (reduction in execution time)
Combination (adaptive + parallel)	6,0	40%	~788

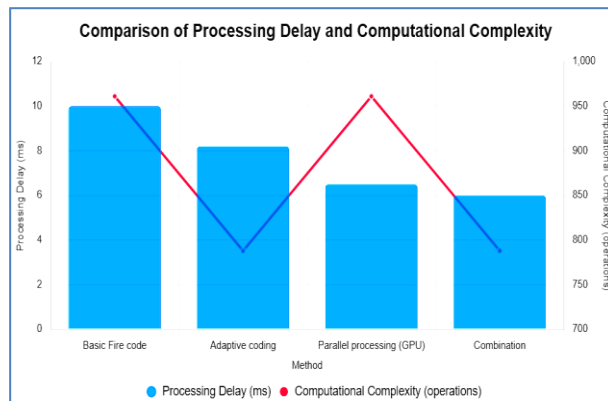


Fig. 3. Comparison of processing delay and computational complexity

These tables and figures clearly demonstrate the advantages of the proposed Fire code optimization methods, confirming their effectiveness in increasing the probability of correct decoding and reducing processing delays. The proposed methods were implemented in a prototype data transmission system. Testing was conducted under conditions of impulse noise lasting 5–10 bits and with a frequency of  $10^{-3}$ – $10^{-2}$ .

The optimization showed these results:

- the chance of correct decoding went up to 99,5% with the hybrid scheme and optimized polynomial;
- processing delay dropped by 30% thanks to parallel processing;
- computational complexity went down by 18% with adaptive decoding;
- redundancy remained at 32,3%, but the hybrid scheme allowed for more efficient use of redundant bits.

### Conclusions and prospects for further research

The study is devoted to the analysis and optimization of the Fire code as an effective tool for ensuring noise immunity in telecommunication systems operating under conditions of short-term impulse noise. The results confirm that the basic Fire code, thanks to its cyclic structure and ability to correct fixed-length packet errors, is a powerful means of counteracting group errors that occur in environments with high levels of electromagnetic noise, such as IoT networks, satellite communications, power cables, or unmanned platforms. However, the analysis revealed key limitations of the classic version of the code: reduced efficiency at high interference intensities (for example, at an error rate of  $10^{-2}$ , the probability of correct decoding is only 92,3%); high computational complexity ( $O(n^2)$  operations), and significant processing delay (up to 10 ms), which makes it less suitable for real-time systems with limited resources. To overcome these limitations, a set of optimization methods has been proposed that combines structural, algorithmic, and hardware improvements.

The results of the comparative analysis presented in Tables 3 and 4 demonstrate that the combined approach (optimized polynomial + hybrid coding) provides the highest efficiency:  $P_{correct}$  reaches 99,5% at  $10^{-3}$  and 94,5% at  $10^{-2}$ , and the overall reduction in the probability of decoding error is up to 35% compared to the baseline variant. The graphs in Figures 2 and 3 illustrate the trend toward increased noise immunity and reduced latency, confirming the practical value of the proposed methods. These improvements were implemented in a prototype data transmission system, where testing under 5–10-bit impulse noise conditions confirmed the stability and scalability of the solutions.

In practical terms, the improved Fire code is recommended for implementation in networks with strict transmission quality requirements, such as military telecommunications complexes, critical infrastructure, and sensor networks. It reduces the number of retransmissions, optimizes power consumption, and provides a compromise between noise immunity and resources, which is critical for modern systems. The corrective properties of the code make it ideal for memory channels where impulse noise dominates over random errors.

Prospects for further research include the integration of artificial intelligence for even more accurate real-time adaptation of code parameters, performance analysis in combination with quantum computing, and experimental testing in real 5G/6G

networks. Overall, the proposed methods not only improve the performance of the Fire code, but also pave the way for the creation of flexible, resource-efficient data protection systems in future telecommunications technologies.

## REFERENCES

1. Wicker, S. B., & Bhargava, V. K., Reed–Solomon Codes and Their Applications. Wiley-IEEE Press, 1999.
2. Ziemer, R. E., & Tranter, W. H., Principles of Communications: Systems, Modulation, and Noise. John Wiley & Sons, 2014.
3. Khudoykulov, Z. “A Comparison of Lightweight Cryptographic Algorithms,” in Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 912, Springer, 2024, pp. 456–467.
4. Fire, P., “A class of multiple-error-correcting codes and the decoding scheme,” RCA Review, vol. 21, no. 3, pp. 293–346, 1959.
5. Lin, S., & Costello, D. J., Error Control Coding: Fundamentals and Applications, 2nd ed., Pearson, 2004.
6. Ryan, W. E., & Lin, S., Channel Codes: Classical and Modern. Cambridge University Press, 2009.
7. Wicker, S. B., Error Control Systems for Digital Communication and Storage. Prentice Hall, 1995.
8. Sharma, A., & Kumar, S., “Channel coding in burst error-prone wireless links,” Wireless Personal Communications, vol. 96, pp. 4095–4110, 2017.
9. Yalamuri, G., Honnavalli, P., & Eswaran, S., “Cryptographic Arsenal to Deal with Post-Quantum Threats,” Procedia Comput. Sci., vol. 215, pp. 834–845, 2022.
10. Рудницький В. М., Лада Н. В., Підласий Д. А. Архітектура СЕТ-операцій і технології потокового шифрування. Черкаси: Пономаренко Р.В., 2024.
11. Бабенко В., Мельник О., Мельник Р., “Класифікація трирозрядних елементарних функцій,” Безпека інформації, т. 19, № 1, С. 56–59, 2013.
12. Ларін В. В., Мельник О. Г., Підласий Д. А., “Оцінка ефективності згорткових кодів при імпульсних завадах,” Системи управління, навігації та зв'язку, № 4, с. 96–101, 2023.
13. Бурачок Р.А., Климаш М.М., Коваль Б.В. Телекомунікаційні системи передавання інформації. Методи кодування. Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2015.

Received (Надійшла) 11.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.08.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Шефер Олександр Віталійович** – доктор технічних наук, професорка, Завідувач кафедри автоматизації, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;

**Oleksandr Shefer** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine;

e-mail: [itm.ovshefer@nupp.edu.ua](mailto:itm.ovshefer@nupp.edu.ua) ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-3415-349X>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57210203269>.

**Євдоченко Олександр Іванович** – аспірант кафедри автоматизації, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;

**Oleksandr Yevdochenko** – postgraduate student of the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine;

e-mail: [alexsen2009@gmail.com](mailto:alexsen2009@gmail.com) ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0001-0431-5144>;

**Підвищення ефективності коду Файра для боротьби з короткими імпульсними завадами**

О. В. Шефер, О. І. Євдоченко

**Анотація. Актуальність.** У сучасних телекомунікаційних мережах надзвичайно важливим є ефективний захист інформації від коротких імпульсних завад, які можуть спричинити локальні пакетні помилки. Особливо характерними такі завади є для середовищ з високим рівнем електромагнітного шуму (наприклад, IoT, силові кабелі, супутниковий зв'язок). Для протидії подібним типам збоїв доцільно застосовувати спеціалізовані коди, зокрема код Файра, який має високу здатність до виявлення та виправлення послідовних бітових помилок фіксованої довжини. **Об'єкт дослідження:** код Файра в системах передачі даних при імпульсних завадах. **Мета статті:** проведення аналізу ефективності і дослідження коду Файра, оптимізація і підвищення ефективності коду за допомогою запропонованих методів оптимізації породжуючого полінома, гібридного кодування, адаптивного кодування і паралельної обробки. **Результати дослідження.** У статті запропоновані і протестовані методи для підвищення ефективності коду Файра в умовах імпульсних завад. Проведено порівняння ймовірності правильного декодування для різних методів. Проведено порівняння затримки обробки та обчислювальної складності. Результати аналізу наочно демонструють переваги запропонованих методів оптимізації коду Файра, підтверджуючи їхню ефективність у підвищенні ймовірності правильного декодування та зменшенні затримки обробки. Запропоновані методи було реалізовано в прототипі системи передачі даних. Результати показали зниження ймовірності помилки декодування до 35% порівняно з базовим варіантом коду. **Висновки.** Аналіз коду Файра підтвердив його ефективність у боротьбі з короткими імпульсними завадами, але виявив обмеження при високій інтенсивності завад і великій обчислювальній складності. Запропоновані методи оптимізації значно підвищили продуктивність коду. Удосконалений код Файра забезпечує підвищену завадостійкість у телекомунікаційних мережах, що дозволяє рекомендувати його для використання в мережах з жорсткими вимогами до якості передачі.

**Ключові слова:** код Файра; завадостійкість; корекційні властивості; надлишковість; затримка обробки; обчислювальна складність.

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Аль-Амморі А. Н.	189	Іванюк О. І.	96	Підлісний Я. А.	177
Андронов В. В.	151	Ілларіонов М. Ю.	21	Плехов О. В.	106
Андрусенко Ю. О.	173	Ірха Д. М.	112	Подорожняк А. О.	117
Бойко М. С.	76	Іщенко Р. М.	189	Радченко В. О.	167
Боряк Б. Р.	27	Капітон А. М.	101	Рожнова Т. Г.	47
Булгаков М. П.	5	Караман Д. Г.	136	Россіхін В. В.	208
Буняка Іна Н. В.	27	Кириленко Д. В.	112	Сальник О. В.	151
Бурдейна Н. Б.	177	Кльон А. М.	41	Сальніков Д. В.	136
Бурлаков А. С.	41	Коваленко А. А.	81	Самокіш А. В.	10
Васильченко О. Г.	136	Коломійцев О. В.	10	Сергеев Д. В.	142
Волощук О. Б.	159	Коробейніков М. Б.	81	Сергородцев І. Д.	142
Главчев М. І.	55	Коробейніков О. Б.	81	Смірнов В. Р.	193
Главчева Ю. М.	55	Кравченко П. О.	81	Тарапата Я. І.	208
Глива В. А.	181	Кужель С. І.	106	Тищенко Д. О.	101
Глоба Є. Ю.	193	Кулак Г. К.	51	Тітова Є. С.	21
Горбачов В. О.	59	Кучук Г. А.	112	Толкаченко Є. А.	10
Горносталь О. А.	64	Ларченко Б. Д.	47	Трет'як А. В.	41
Гук А. С.	21	Ларченко Л. В.	47	Федоров В. М.	59
Гусев В. М.	185	Левківський Р. М.	185	Федорченко В. М.	193
Давиденко Л. П.	27	Левченко Д. В.	117	Фесенко Т. Г.	142
Даценко С. С.	173	Лисиця Д. О.	112	Фомін О. С.	41
Даценко С. С. (мол.)	72	Литвинов А. П.	106	Франчук Т. М.	101
Демченко О. І.	199	Логінов О. В.	5	Харченко В. С.	128
Деркач Т. М.	76	Любченко Н. Ю.	117	Хаханова Г. В.	51
Десятко А. М.	101	Любченко О. В.	203	Хаханова І. В.	51
Долгополов О. М.	142	Малишенко Д. О.	159	Хижняк І. А.	151
Дрючко О. Г.	27	Малохвій Е. Е.	122	Худов Г. В.	151
Дяченко В. О.	21	Мельник О. М.	5	Челак В. В.	64
Дяченко Д. О.	81	Минко П. Є.	151	Чуев О. В.	87
Дяченко П. В.	189	Морозова О. І.	87	Чумаченко С. В.	199
Євдоченко О. І.	213	Нараєвський М. С.	193	Шевченко О. Ю.	51
Євтушенко О. С.	33	Нікітіна Т. С.	87	Шефер О. В.	213
Єрошенко О. А.	37	Німіч І. О.	189	Шиленко М. П.	37
Жук М. В.	142	Обрізан В. І.	51	Шматко О. В.	159
Заїка В. В.	87	Осадчий Д. Б.	181	Ястреба В. С.	76
Заковортний О. Ю.	33	Осієвський С. В.	10	Ястреба С. П.	41
Захаров Р. О.	101	Остапенко Л. Ю.	128	Ященко О. М.	208
Захарченко Р. В.	27	Панченко В. І.	10		
Зозуля С. В.	185	Пироженко С. С.	167		

Наукове видання

## СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць

Випуск 3 (81)

Відповідальна за випуск *К. С. Нестеренко*Технічний редактор *Т. В. Уварова*Коректор *О. В. Морозова*Комп'ютерна верстка *Н. Г. Кучук, І. Ю. Петровська*Оформлення обкладинки *І. В. Льїна*Ідентифікатор медіа R30-04135 згідно з рішенням Національної ради України  
з питань телебачення і радіомовлення від 25.04.2024 № 1416

Підписано до друку 30.09.2025. Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 27,25. Тираж 120 прим. Зам. 930-25

Адреса редакції: Україна, 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24, тел. (050) 302-20-71

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Віддруковано з готових оригінал-макетів у цифровій друкарні Impress

61002, м. Харків, вул. Пушкінська, 56, тел. + 38 (057) 714-52-11

e-mail: [irina@impress.biz.ua](mailto:irina@impress.biz.ua)