

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 1 (83)

Issue 1 (83)

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 13 лютого 2026 року № 2).

*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 • 2026

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:

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, проф., Київ, Україна*);

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:

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.), Prof., Kyiv, Ukraine*);

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

НАВІГАЦІЯ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

<i>Пащенко Р. Е., Марюшко М. В.</i> Оцінка розмірів аномалій на космічних знімках сільськогосподарських земель з використанням фрактальних розмірностей	5
---	---

АВТОМОБІЛЬНИЙ, РІЧКОВИЙ, МОРСЬКИЙ ТА АВІАЦІЙНИЙ ТРАНСПОРТ

<i>Галінський Д. О.</i> Моделі та метод планування руху рою безпілотних літальних апаратів при виконанні спеціальних місій з урахуванням пріоритету завдань	12
---	----

УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

<i>Дрючко О. Г., Шефер О. В., Кислиця С. Г., Захарченко Р. В., Боряк Б. Р.</i> Розробка і автоматизація технічного оснащення роботизованих комплексів штампування	18
<i>Криворот А. І., Васильєв Є. А., Васильєв О. С., Дураченко Г. Ф.</i> Вплив виду моторного палива та швидкісних режимів руху на коефіцієнт навантаження двигуна автомобіля категорії М1	25
<i>Носков В. І., Гавриленко С. Ю., Скородєлов В. В., Гейко М. В.</i> Визначення енерговитрат з використанням траєкторії руху поїзду	31

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Андрусенко Ю. О., Радченко В. О.</i> Оптимізація використання ресурсів у гетерогенних ґрид - системах з нестационарним вхідним потоком	35
<i>Бондаренко М. Е., Іващенко Г. С.</i> Багатовекторна голосова ідентифікація користувача з урахуванням фонетичних варіацій голосу	40
<i>Hirianskyi B., Bulakh B.</i> Effectiveness of evolutionary algorithms in neural network optimization tasks: unconditional minimization, pruning, and hyperparameter optimization	45
<i>Главчев М. І., Главчева Ю. М., Ліпчанський М. В., Баленко О. І.</i> Трирівнева система верифікації графічного контенту наукових публікацій на основі топологічного аналізу даних	51
<i>Golovko G., Rudenko O.</i> Comparative analysis of modern cryptographic ciphers and the AES algorithm	58
<i>Двірна О. А., Набока С. В.</i> Оптимізація продуктивності хмарних сервісів: методи та їх ефективність ..	62
<i>Єрошенко О. А., Піняєв Є. В., Пивоварова Д. І., Кравченко П. О.</i> Метод оптимізації publish-subscribe архітектур для інтелектуального інформування в умовах обмежених ресурсів IoT	69
<i>Зарічний Я. С.</i> Рекомендація сервісу на основі гібридної моделі семантичного пошуку	77
<i>Клівець С. І., Криховецький Г. Я., Кулешова Т. В.</i> Синтез мережі зв'язку кластера туманного шарувисокощільного промислового Інтернету речей	82
<i>Олейнічук В. В., Янковський О. А., Львіна І. В.</i> Мікроконтролерна система для дослідження змін щільності кісткової тканини	86
<i>Панченко В. І.</i> Розробка та дослідження узагальненого методу синтезу тестів для діагностики інтелектуального шлюзу периферійного шару високощільного Інтернету речей	90
<i>Пироженко С. С., Гук А. С.</i> Проектування структури імітаційної моделі гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних	95
<i>Поворознюк О. А., Поворознюк А. І.</i> Інформаційно-пошукова система електронної комерції з оцінкою релевантності пошуку	99
<i>Tyrtysnyi D.</i> Comparative analysis of automated tools for client-side performance testing in modern web environments	107
<i>Челак В. В., Горносталь О. А.</i> Удосконалений метод побудови дерев з багатовимірними вузлами рішення для ідентифікації стану комп'ютерних систем	113
<i>Челак С. В., Гейко Г. В.</i> Класифікація вразливостей програмного забезпечення та формування ознак їх наявності на основі методів машинного навчання	122
<i>Чкіна Н. О., Антонова І. В.</i> Порівняльний аналіз часових рядів	126
<i>Shostak A.</i> Comparative experimental analysis of methods for implementing the AVL tree	131
<i>Yarovyi V., Barkovska O., Maksymov D., Ni Ya., Raptanov D.</i> Methods for recognising hand gestures using computer vision to assist people with movement or speech impairments	135

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

<i>Бірук Я. І.</i> Заходи нормалізації фізичних факторів середовища будівель і споруд у процесах їх реконструкції та відновлення	142
<i>Глива В. А., Патерега Ю. І., Шабатура Т. В.</i> Визначення електромагнітного навантаження на середовище методами моделювання поширення електромагнітних полів	148
<i>Краснянський Г. Ю., Бурдейна Н. Б.</i> Модифікація розрахункової методики визначення ефективності термоізоляції стіни будівлі	153
<i>Лашко С. С.</i> Метрологічна оцінка результатів вимірювань джерел техногенного забруднення гірничовидобувного підприємства	157

<i>Левченко Л. О., Підлісний Я. А., Бурдейний Б. В., Карачун А. В.</i> Моделювання поширення електромагнітних полів та оптимізація ефективності захисних конструкцій	163
<i>Николаєв К. Д., Білик А. С., Сапожников К. М., Козлітін О. О.</i> Аналіз теоретичних засад керування захисними властивостями електромагнітних екранів	168
<i>Ченчева О. О., Сукач С. В.</i> Ризик-орієнтована оцінка пожежної та вибухової небезпеки побутових електрогенераторів у щільній міській забудові	173

ЗВ'ЯЗОК, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

<i>Vasylichenko O., Poroshenko A., Yaroshevych R., Kholiev V., Shostak M. V.</i> Model for organizing hybrid communication in a microservice architecture on the .net platform	177
<i>Vasiuta Vas., Bedryk M., Vasiuta Vic.</i> Quadrocopter hardware and software development	182
<i>Воронець О. М., Воронець В. М., Пустовойтов П. Є.</i> Самоорганізована маршрутизація в телекомунікаційних мережах з урахуванням втрат вузлів	186
<i>Запорожець О. В., Макаренко В. С., Дрозд О. Ю.</i> Оптимізація алгоритмів планування процесів в операційних системах з використанням імітаційного моделювання	192
<i>Костяк М. Ю., Синявський О. Ю.</i> Синтез сигналу управління каналу зв'язку БПЛА методом динамічного програмування	198
<i>Леві Л. І., Фомін О. С., Олексієнко Д. Р.</i> Оптимізація структурних елементів оперативного керування ієрархічно організованих інженерних мережних систем	202
<i>Lozko O., Lysechko V., Syvolovskyi I., Pastushenko V.</i> Method of multi-criteria optimisation of data flow distribution in self-organised telecommunications networks	206
<i>Суровицький М. М., Філімончук Т. В., Партика С. О., Севостьянова О. М.</i> Модель оптимізації комп'ютерної мережі закладу вищої освіти на основі використання технологій передачі даних	214
<i>Чертанов Я. В., Коваленко А. А., Філіппов В. В.</i> Підхід до вибору протоколу та архітектури автономної ділянки граничного шару IoT	224
<i>Шиман М. В., Савченко М. В.</i> Метод аналізу впливу різномірності трафіку на затримки у телекомунікаційних системах	231
АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК	236

Організації авторів

Інститут радіофізики та електроніки імені О. Я. Усикова
НАН України, Харків, Україна

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

Кременчуцький національний університет імені Михайла
Остроградського, Кременчук, Україна

Міжрегіональна академія управління персоналом, Київ,
Україна

Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, Київ, Україна

Національний аерокосмічний університет «ХАІ», Харків,
Україна

Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», Харків, Україна

Національний технічний університет України «КПІ імені
Ігоря Сікорського», Київ, Україна

Національний університет «Київський авіаційний інститут»
, Київ, Україна

Національний університет «Львівська політехніка», Львів,
Україна

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

Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна,
Харків, Україна

Харківський національний університет радіоелектроніки,
Харків, Україна

Харківський національний університет Повітряних Сил
імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

Українська державна льотна академія, Кропивницький,
Україна

Український державний університет залізничного
транспорту, Харків, Україна

Authors affiliation

Ya. Usikov Institute for Radiophysics and
Electronics of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

Kyiv National University of Construction and
Architecture, Kyiv, Ukraine

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National
University, Kremenchuk, Ukraine

Interregional Academy of Personnel
Management, Kyiv, Ukraine

Research Institute of Military Intelligence, Ukraine

National Aerospace University "KHAU", Kharkiv,
Ukraine

National Technical University "Kharkiv Polytechnic
Institute", Kharkiv, Ukraine

National Technical University "Igor Sikorsky Kyiv
Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

National University "Kyiv Aviation Institute," Kyiv,
Ukraine

Lviv Polytechnic National University, Lviv,
Ukraine

National University "Yuri Kondratyuk Poltava
Polytechnic", Poltava, 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

Ukrainian State Flight Academy, Kropyvnytskyi,
Ukraine

Ukrainian State University of Railway Transport,
Kharkiv, Ukraine

Навігація та геоінформаційні системи

УДК 528.88 + 515.127.1

doi: 10.26906/SUNZ.2026.1.005

Р. Е. Пащенко¹, М. В. Марюшко²

¹ Інститут радіофізики та електроніки імені О. Я. Усикова НАН України, Харків, Україна

² Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

ОЦІНКА РОЗМІРІВ АНОМАЛІЙ НА КОСМІЧНИХ ЗНІМКАХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ЗЕМЕЛЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ФРАКТАЛЬНИХ РОЗМІРНОСТЕЙ

Анотація. У теперішній час сільськогосподарські роботи виконуються з високою динамікою і оцінка їх результатів потребує постійного моніторингу. **Предметом** дослідження є оцінка можливості визначення розмірів аномальних ділянок поля на космічних знімках з використанням фрактальних розмірностей, що розраховуються у «вікна» різних розмірів. **Об'єктом** дослідження є сільськогосподарські землі на яких проводилися роботи та які зафіксовані на космічних знімках супутника Sentinel-2. **Метою** є оцінка впливу розмірів «вікна» на величини фрактальних розмірностей космічних знімків під час моніторингу сільськогосподарських земель для визначення розмірів аномальних ділянок на них. **Отримані такі результати.** Досліджено вплив розмірів «вікна», яке бере участь у побудові поля фрактальних розмірностей, на величини мінімальних, максимальних і середніх значень фрактальних розмірностей космічних знімків сільськогосподарських земель на яких походилися роботи. Поступове збільшення, а потім зменшення різниць середніх фрактальних розмірностей під час збільшенні розмірів «вікна» характеризує наявність світлих і темних ділянок на космічному знімку, що обумовлені проведенням сільськогосподарських робіт. За зміною різниць мінімальних фрактальних розмірностей можна оцінити розміри світлих ділянок на космічному знімку, а за зміною різниць максимальних фрактальних розмірностей – темних ділянок. **Висновки.** Використання «вікон» різного розміру під час фрактального аналізу дозволяє визначати розміри різних аномальних структур на космічному знімку за рахунок зміни різниць мінімальних, максимальних і середніх фрактальних розмірностей.

Ключові слова: моніторинг стану сільськогосподарських земель, космічні знімки, фрактальна розмірність, аномальна ділянка.

Вступ

Для отримання інформації про стан і структуру земельних ділянок та посівних площ і виявлення ділянок землі, що мають ерозійні порушення, а також інші види деградації землі, доцільно здійснювати моніторинг сільськогосподарських земель [1]. Крім того, у теперішній час сільськогосподарські роботи виконуються з високою динамікою і оцінка їх результатів потребує постійного моніторингу. Для виявлення фактів впливу природних, техногенних і антропогенних факторів на посіви сільськогосподарських культур також використовується агроекологічний моніторинг [2].

Для проведення регулярного космічного моніторингу земель сільськогосподарського призначення використовуються дані дистанційного зондування Землі (космічні знімки), які можуть отримуватися з періодичністю 5-8 діб. Космічні знімки, що використовуються для вирішення цих завдань, мають просторову роздільну здатність 10-30 м [1]. На супутниках дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) розміщують різноманітні датчики, які дозволяють відображати стан рослинності на великих площах. Наприклад, на супутниках Sentinel-2 розташована знімальна апаратура MSI (Multispectral Instrument), яка дозволяє отримувати широкосмугові мультиспектральні зображення (13 спектральних діапазонів) з просторовим розподілом 10 м [3]. Космічні знімки супутника Sentinel-2 в мережі Інтернет можна отримувати 2 рази

на тиждень на задану територію. Необхідно зазначити, що для організації моніторингу сільськогосподарських земель важливим є не тільки отримання даних дистанційного зондування Землі ДЗЗ, але й спосіб обробки космічних знімків. Спосіб обробки космічних знімків впливає на достовірність одержуваних результатів, і залежно від цього користувачі зможуть приймати ефективні управлінські рішення.

У теперішній час гіперспектральна зйомка широко використовуються для моніторингу та оцінки стану підстильної поверхні [1], а розрахунок спектральних параметрів поглинання рослинності з використанням спеціальних алгоритмів аналізу таких знімків дозволяє покращити якість їх дослідження. Але для отримання гіперспектральних знімків необхідна складна апаратура великої вартості, а складні алгоритми обробки таких знімків впливають на достовірність отриманих даних.

У теперішній час часто застосовуються методи фрактального аналізу зображень для підвищення інформативності космічних знімків під час моніторингу земної поверхні [4, 5]. Оцінити складність структури поверхонь можна за величиною фрактальних розмірностей цифрових зображень. Методи фрактального аналізу дають можливість використовувати зображення в одному діапазоні хвиль, що спрощує отримання космічних знімків. У роботах [6, 7] описано, як для оцінки стану сільськогосподарських культур на різних фазах вегетації застосовується фрактальний аналіз космічних знімків супу-

тника Sentinel-2. Але питання моніторингу змін стану сільськогосподарських земель в цих роботах не розглядаються. Можливість використання фрактального аналізу космічних знімків для визначення змін стану сільськогосподарських полів під впливом різних чинників розглянута у роботі [8], але у цій роботі не розглядається можливість визначення розмірів аномальних ділянок на космічних знімках. Тобто застосування фрактального аналізу для визначення розмірів ділянок поля на яких проводяться сільськогосподарські роботи є перспективним напрямком досліджень і аналіз впливу розмірів «вікна» під час розрахунку величин фрактальних розмірностей космічних знімків у цих умовах є актуальним.

Мета статті: оцінити вплив розмірів «вікна» на величини фрактальних розмірностей космічних знімків під час моніторингу сільськогосподарських земель для визначення розмірів аномальних ділянок на них.

Характеристика космічних знімків сільськогосподарських земель

Для виявлення та оцінки аномальних ділянок сільськогосподарських земель на космічних знімках користувачам необхідно витратити багато часу для їх моніторингу. Розглянемо можливість оцінки стану сільськогосподарських земель з використанням космічних знімків супутника Sentinel-2. Зазначені космічні знімки є у вільному доступі у мережі Інтернет [3].

Для оцінки розмірів аномалій на космічних знімках сільськогосподарських земель будемо застосовувати окремі космічні знімки земель Вільхуватської сільської ради Чутівського району Полтавської області (землі приватного сільськогосподарського підприємства «Дружба») [9]. Зазначені космічні знімки мають просторове розрізнення 10 метрів і були отримані протягом 2018 року. Для спрощення подальших досліджень було вибрано тільки одне поле, як к було засіяне кукурудзою. На цьому полі проводилися польові роботи і на космічних знімках виникли аномальні ділянки.

На рис. 1 наведено елементи знімків поля з кукурудзою, які були вирізані з космічних знімків супутника Sentinel-2 (канал b8), у різні дати: 04.06.2018 (а); 29.06.2018 (б); 29.07.2018 (в); 23.08.2018 (г).

На рис. 1, а і б (04.06.2018; 29.06.2018) видно, що структура елементів космічних знімків (відтінки градації сірого) відрізняються для різних дат. Так на початку червня спостерігаються більш світлі градації сірого, а у кінці червня відтінки сірого стають темними. На рис. 1, в (29.07.2018) видно, що у кінці липня на полі, яке досліджується, проводилися польові роботи. На космічному знімку з'явилися аномальні ділянки і спостерігається зміна градацій сірого та їх нерівномірність. У кінці серпня (рис. 1, г, 23.08.2018) польові роботи на полі вже було завершено і космічний знімок знову має однорідні градації сірого, але вони більш темні. Розглянемо як відображається динаміка проведення польових робіт на космічних знімках (у кінці липня і на початку серпня).

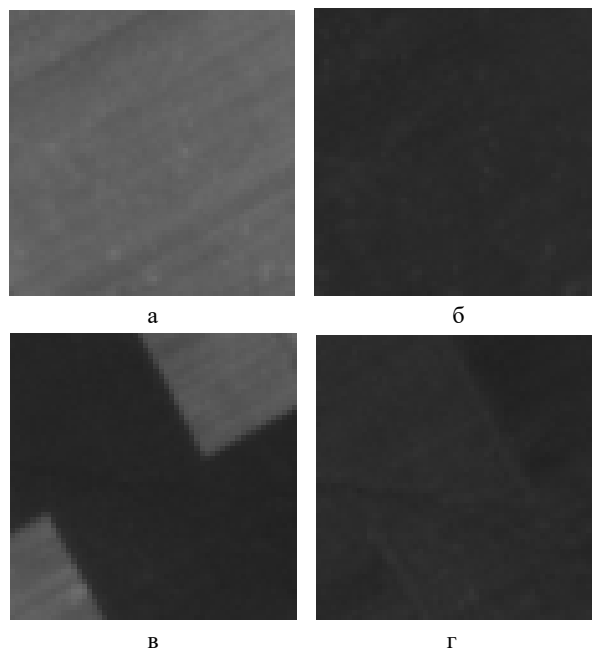


Рис. 1. Елементи космічних знімків (канал b8 супутника Sentinel-2) поля з кукурудзою станом на: 04.06.2018 (а); 29.06.2018 (б); 29.07.2018 (в); 23.08.2018 (г)

На рис. 2 наведено елементи космічних знімків супутника Sentinel-2 (канал b8), які показують динаміку польових робіт на полі з кукурудзою для чотирьох дат: 29.07.2018 (а); 05.08.2018 (б); 08.08.2018 (в); 10.08.2018 (г).

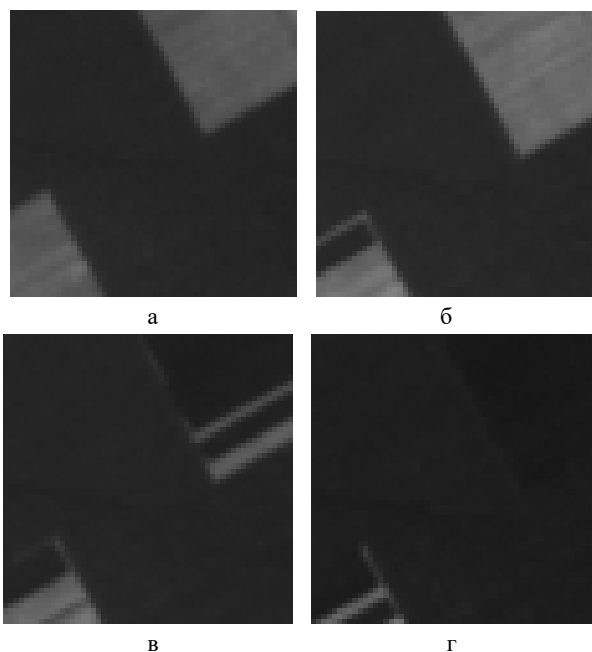


Рис. 2. Елементи космічних знімків (канал b8 супутника Sentinel-2) поля, засіяного кукурудзою, на якому проводилися польові роботи станом на: 29.07.2018 (а); 05.08.2018 (б); 08.08.2018 (в); 10.08.2018 (г)

Як видно на рис. 2, розміри ділянок з різною структурою для чотирьох дат будуть різні. На рис. 2, а і б розміри світлих ділянок практично однакові, на рис. 2, в видно, що товщина (не довжина) світлих ділянок зменшується, крім того

вони мають шарувату структуру, а на рис. 2, г світлі ділянки мають невеликі розміри і розміщуються у лівому нижньому куті космічного знімка.

Таким чином, візуальний аналіз космічних знімків сільськогосподарських земель на яких проводилися роботи (зміна їх стану) дозволяє лише констатувати, що роботи проводилися. Але визначити розміри аномалій, які спостерігаються на космічних знімках (розміри ділянок на яких були проведені сільськогосподарські роботи), за результатами візуального аналізу не можливо.

Проведемо обробку космічних знімків супутника Sentinel-2, розглянутого вище поля, засіяного кукурудзою, з використанням фрактального аналізу і розглянемо вплив розмірів «вікна» на величини фрактальних розмірностей. Також розглянемо можливість визначення розмірів аномальних ділянок на космічних знімках з використанням фрактальних розмірностей, що розраховуються у «вікнах» різних розмірів.

Оцінка розмірів аномалій на космічних знімках сільськогосподарських земель з використанням фрактальних розмірностей

Космічний знімок, отриманий з супутника ДЗЗ, можна розглядати, як матрицю значень інтенсивності відбиття світлової хвилі (сонячного випромінювання) від поверхні землі. Земна поверхня є різномірною структурою і кожна точка підстильної поверхні має власні властивості, які по різному впливають на параметри світлової хвилі. Завдяки цьому інформація, яку несе світлова хвиля про об'єкт спостереження, по різному відображається на космічному знімку.

Під час оброблення космічних знімків супутника Sentinel-2 поля з кукурудзою на якому проводилися роботи будемо будувати поле фрактальних розмірностей (ПФР). У роботі [5] процес побудови ПФР розглянуто детально. Для побудови ПФР вибирається «вікно» певного розміру і з використанням цього «вікна» проводиться сканування космічного знімка. На кожному кроці сканування (для кожного положення «вікна») визначається числове значення фрактальної розмірності. Таким чином отримується набір фрактальних розмірностей, який створює матрицю D , так зване «поле фрактальних розмірностей». Під час проведення досліджень розміри елемента космічного знімку дорівнювали 56×56 пікселів, а розміри «ковзаючого вікна» змінювалися від 4×4 пікселі до 32×32 пікселі.

У теперішній час існує велика кількість типів фрактальних розмірностей [4], які відрізняються методами їх розрахунку. Але всі методи визначення фрактальних розмірностей базуються підрахунку об'єму або площі форми підстильної поверхні і оцінки того, як ця форма змінюється у різних масштабах. Найчастіше для дослідження цифрових зображень (космічних знімків) застосовують метод покриття [10] і метод призми визначення фрактальної розмірності [5].

Метод покриття розрахунку фрактальної розмірності призначений для визначення розмірності Гаусдорфа-Безіковича за допомогою такого виразу:

$$D_1 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)}, \quad (1)$$

де ε – довжина сторони куба (максимальна довжина може дорівнювати розміру «вікна»), яким покривають цифрове зображення; $N(\varepsilon)$ – кількість кубів з довжиною сторони ε , що містить тривимірне подання зображення.

Метод призми розрахунку фрактальної розмірності використовує для визначення розмірності наступний вираз:

$$D_2 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log P(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)}, \quad (2)$$

де ε – довжина сторони основи зрізаної призми (максимальна довжина може дорівнювати розміру «вікна»); $P(\varepsilon)$ – площа поверхні призми (її верхньої грані) з довжиною сторони її основи ε .

Коротко розглянемо порядок визначення фрактальних розмірностей за допомогою методу покриття і методу призми. Спочатку у методі покриття вибирається деякий куб, довжина сторони якого дорівнює ε , і цим кубом покривається тривимірне подання космічного знімка. А потім визначається кількість кубів з довжиною сторони ε , що накривають весь космічний знімок $N(\varepsilon)$.

Під час реалізації методу призми спочатку з використанням даних про яскравості космічного знімка у кутах «вікна» розміром ε будується верхня грань призми, а потім визначається (розраховується) її площа $P(\varepsilon)$.

У подальшому для методу покриття і методу призми розраховуються значення $N(\varepsilon)$ і $P(\varepsilon)$, відповідно, для декількох інших величин ε . Якщо, наприклад, величини дорівнюють $\varepsilon_2 = \varepsilon_1/2$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_1/4$, $\varepsilon_4 = \varepsilon_1/8$, то отримують по чотири значення $N(\varepsilon)$ і $P(\varepsilon)$. Кількість значень може бути різною і залежить від структури (форми) підстильної поверхні, що відображена на космічному знімку.

Після отримання значень $N(\varepsilon)$ і $P(\varepsilon)$ в методі покриття і методі призми будуються графіки логарифмічної залежності $\log N(\varepsilon)$ або $\log P(\varepsilon)$, відповідно, від $\log 1/\varepsilon$. За побудованими точками виконується лінійна апроксимація з використанням методу найменших квадратів (МНК). Використання МНК для апроксимації забезпечує автоматизацію отримання фрактальних розмірностей. Визначивши тангенс кута нахилу апроксимованої прямої заходиться величина фрактальної розмірності D .

Для візуалізації отриманого ПФР космічного знімка можна здійснити розподіл всього діапазону змін фрактальних розмірностей на ПФР, розбиваючи його на декілька рівнів. Кожен рівень розбиття можна відобразити певним кольором. Фрактальні розмірності з близькими числовими значеннями об'єднуються в окремі області і таким чином здійснюється сегментація космічного знімка за величиною фрактальної розмірності [8].

На рис. 3, а-г наведено візуальні подання ПФР побудовані для космічних знімків поля, засіяного кукурудзою (рис. 2, а-г), на якому проводилися польові роботи, станом на: 29.07.18 (а), 05.08.18 (б),

08.08.18 (в), 10.08.18 (г). Побудова ПФР цих космічних знімків здійснювався з використанням методу призми і «ковзаючого вікна» розміром 5×5 пікселів. Весь діапазон змін фрактальних розмірностей розподілявся на 5 рівнів.

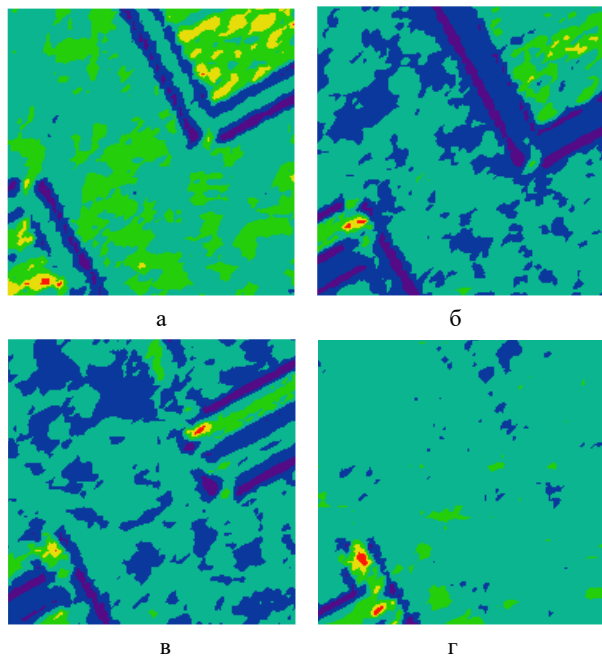


Рис. 3. Візуальне подання ПФР космічних знімків поля, засіяного кукурудзою, на якому проводилися польові роботи, станом на: 29.07.18 (а); 05.08.18 (б); 08.08.18 (в); 10.08.18 (г)

Як видно на рис. 3, візуальне подання ПФР дає змогу провести розподіл елементів знімків з різною структурою, тобто здійснити його сегментацію. Побудова і візуалізація ПФР дає змогу наочно дослідити зміну стану сільськогосподарських земель, які обумовлені проведенням польових робіт.

На візуальному поданні ПФР добре розрізняються межі ділянок поля на яких проводяться роботи. Крім того, можна визначити межі проведених робіт, що виконувалися не так давно, особливо це спостерігається на рис. 3, а, б.

На цих рисунках видно дві межі, одна – відокремлює ділянки поля з різним типом поверхні, а інша – ділянки з різним часом проведення польових робіт. Необхідно зазначити, що на вихідних космічних знімках візуально проявляється тільки межа з різним типом поверхні (див. рис. 2, в, г). На рис. 3, в, г видно, як розподіляються ділянки поля, на яких роботи ще не закінчені, тобто виявляються локальні аномалії поля.

Таким чином, розрахунок та візуальне подання ПФР космічних знімків сільськогосподарських земель дає змогу здійснювати їх сегментацію і визначити межі проведених польових робіт, але оцінити розміри аномальних ділянок в цьому випадку можна тільки якісно.

Використання «вікон» різного розміру під час аналізу космічних знімків на яких є аномальні ділянки дає змогу визначити їх розміри.

У табл. 1 наведено величини мінімальних, максимальних і середніх фрактальних розмірностей на космічних знімках поля, засіяного кукурудзою, при різних розмірах «вікна». Фрактальні розмірності космічних знімків були розраховані з використанням методу покриття. Необхідно нагадати, що на полі в кінці липня та на початку серпня проводилися польові роботи (рис. 1, в).

Як видно з даних табл. 1, у дати 29.07.18, 05.08.18, 08.08.18 і 10.08.18 спостерігаються аномальні значення середніх і мінімальних фрактальних розмірностей для всіх розмірів «вікон», а аномальні значення максимальних фрактальних розмірностей тільки для «вікон» великих розмірів – 32×32 і 48×48 пікселя.

Таблиця 1 – Величини мінімальних, максимальних і середніх значень фрактальних розмірностей космічних знімків поля, засіяного кукурудзою, при різних розмірах «вікна»

Дата	Розмір «вікна» у пікселях								
	4 × 4			8 × 8			16 × 16		
	D_{\min}	D_{\max}	$D_{\text{сер}}$	D_{\min}	D_{\max}	$D_{\text{сер}}$	D_{\min}	D_{\max}	$D_{\text{сер}}$
04.06.18	2,909	2,996	2,971	2,916	2,989	2,968	2,946	2,981	2,966
14.06.18	2,897	2,994	2,969	2,926	2,988	2,965	2,942	2,980	2,962
16.06.18	2,889	2,994	2,964	2,925	2,984	2,961	2,932	2,980	2,959
21.06.18	2,904	2,992	2,966	2,922	2,988	2,963	2,938	2,978	2,959
26.06.18	2,885	2,996	2,969	2,920	2,992	2,966	2,937	2,979	2,964
29.06.18	2,865	2,998	2,962	2,911	2,988	2,956	2,927	2,985	2,952
29.07.18	2,554	2,999	2,943	2,604	2,989	2,923	2,654	2,985	2,877
05.08.18	2,459	2,995	2,933	2,529	2,988	2,914	2,601	2,982	2,867
08.08.18	2,488	2,999	2,923	2,549	2,994	2,900	2,612	2,985	2,857
10.08.18	2,330	2,998	2,943	2,482	2,983	2,934	2,604	2,980	2,922
18.08.18	2,879	2,996	2,966	2,895	2,989	2,963	2,920	2,981	2,969
23.08.18	2,863	2,994	2,960	2,876	2,982	2,957	2,900	2,978	2,954
25.08.18	2,877	2,996	2,963	2,899	2,980	2,960	2,926	2,981	2,958

Закінчення табл. 1

Дата	Розмір «вікна» у пікселях								
	24 × 24			32 × 32			48 × 48		
	D_{\min}	D_{\max}	$D_{\text{сер}}$	D_{\min}	D_{\max}	$D_{\text{сер}}$	D_{\min}	D_{\max}	$D_{\text{сер}}$
04.06.18	2,952	2,979	2,961	2,955	2,965	2,961	2,963	2,965	2,964
14.06.18	2,945	2,978	2,958	2,948	2,966	2,956	2,957	2,960	2,959
16.06.18	2,941	2,977	2,957	2,945	2,964	2,956	2,954	2,958	2,957
21.06.18	2,947	2,971	2,958	2,951	2,970	2,958	2,956	2,961	2,957
26.06.18	2,944	2,971	2,963	2,948	2,971	2,963	2,952	2,965	2,959
29.06.18	2,933	2,964	2,948	2,938	2,960	2,947	2,943	2,948	2,947
29.07.18	2,679	2,979	2,813	2,706	2,862	2,779	2,779	2,818	2,796
05.08.18	2,634	2,976	2,794	2,675	2,873	2,759	2,756	2,807	2,788
08.08.18	2,643	2,980	2,802	2,679	2,945	2,765	2,723	2,766	2,745
10.08.18	2,642	2,979	2,908	2,663	2,963	2,878	2,678	2,815	2,717
18.08.18	2,937	2,974	2,960	2,949	2,971	2,960	2,953	2,961	2,957
23.08.18	2,926	2,969	2,955	2,933	2,969	2,954	2,939	2,958	2,947
25.08.18	2,932	2,971	2,957	2,938	2,967	2,957	2,944	2,962	2,953

Поява аномальних величин фрактальних розмірностей була обумовлена проведенням польових робіт на полі, що відобразилося на космічних знімках. Як зазначалося вище, на цих космічних знімках відображаються ділянки поля з різною структурою. Крім того, розміри (товщина) світлих ділянок для різних дат також різні і мають шарувату структуру. На рис. 2, г також видно, що у лівому нижньому куті космічного знімка знаходяться тільки дві світлі ділянки невеликого розміру (товщини і довжини).

З даних табл. 1 також видно, що при збільшенні розмірів «вікна» мінімальні фрактальні розмірності збільшуються, а середні фрактальні розмірності зменшуються (крім «вікна» розміром 48 × 48 пікселів для дат 29.07.2018 і 05.08.2018). Максимальні фрактальні розмірності при збільшенні розмірів «вікна» зменшуються, але аномальні значення проявляються тільки для «вікон» розміром 32 × 32 і 48 × 48 пікселів.

Розглянемо на скільки змінюються величини мінімальних, максимальних і середніх фрактальних розмірностей при збільшенні розмірів «вікна». На рис. 4 наведено графіки змін зазначених фрактальних розмірностей для чотирьох дат: 29.07.2018 (а), 05.08.2018 (б), 08.08.2018 (в) і 10.08.2018 (г).

На рис. 4 по осі абсцис відкладена різниця у розмірах «вікна», так $\Delta w = 8 = 8 \times 8 - 4 \times 4$, $\Delta w = 16 = 16 \times 16 - 8 \times 8$, $\Delta w = 24 = 24 \times 24 - 16 \times 16$ і т. д., а по осі ординат різниця мінімальних (штрихова лінія), максимальних (точкова лінія) і середніх (суцільна лінія) фрактальних розмірностей (ΔD_w) між сусідніми розмірами «вікна». Як видно на рис. 4, а, різниці мінімальних фрактальних розмірностей (штрихова лінія) починають зменшуватися при збільшенні розмірів «вікна» до 24 × 24 пікселя і збільшується до максимального значення при розмірі «вікна» 48 × 48 пікселів.

Різниці максимальних фрактальних розмірностей (точкова лінія) при невеликих розмірах «вікна»

не змінюються і мають екстремальне значення при розмірі «вікна» 32 × 32 пікселя. Різниці середніх фрактальних розмірностей (суцільна лінія) спочатку збільшуються до розмірів «вікна» 24 × 24 пікселя, а потім зменшуються. Такий же характер змін різниць мінімальних, максимальних і середніх фрактальних розмірностей спостерігається і на рис. 4, б для знімка станом на 05.08.2018.

Якщо проаналізувати структуру підстильної поверхні на цих космічних знімках (див. рис. 2, а, б), то можна побачити, що вона практично однакова. Розміри світлих ділянок складають приблизно від 16 до 24 пікселів, на цих розмірах «вікна» різниці мінімальних фрактальних розмірностей (штрихові лінії на рис. 4, а і б) починають зменшуватися. Розміри темних ділянок більші, і складають від 24 до 32 пікселів, при яких існує екстремум різниць максимальних фрактальних розмірностей (точкові лінії на рис. 4, а і б).

Поступове збільшення, а потім зменшення різниць середніх фрактальних розмірностей (суцільні лінії на рис. 4, а і б) характеризує наявність світлих і темних ділянок близьких розмірів – від 24 до 32 пікселів. Таким чином, за зміною різниць мінімальних фрактальних розмірностей можна оцінити розміри світлих ділянок на космічному знімку, а за зміною різниць максимальних фрактальних розмірностей – темних ділянок.

На рис. 2, в (для знімка станом на 08.08.2018) видно, що структура світлих і темних ділянок змінюється, товщина, але не довжина, світлих ділянок зменшується і вони стають шаруваті, а більша частина знімка має темну градацію сірого. При цьому змінюється поведінка різниць середніх і максимальних фрактальних розмірностей (суцільна і точкова лінії на рис. 4, в), а характер змін різниць мінімальних фрактальних розмірностей (штрихова лінія на рис. 4, в) залишається практично таким, як і на рис. 4, а і б. З цього можна зробити висновок, що

довжина світлих ділянок залишається практично не змінною – від 16 до 24 пікселів, а розміри темних ділянок збільшуються до 48 пікселів.

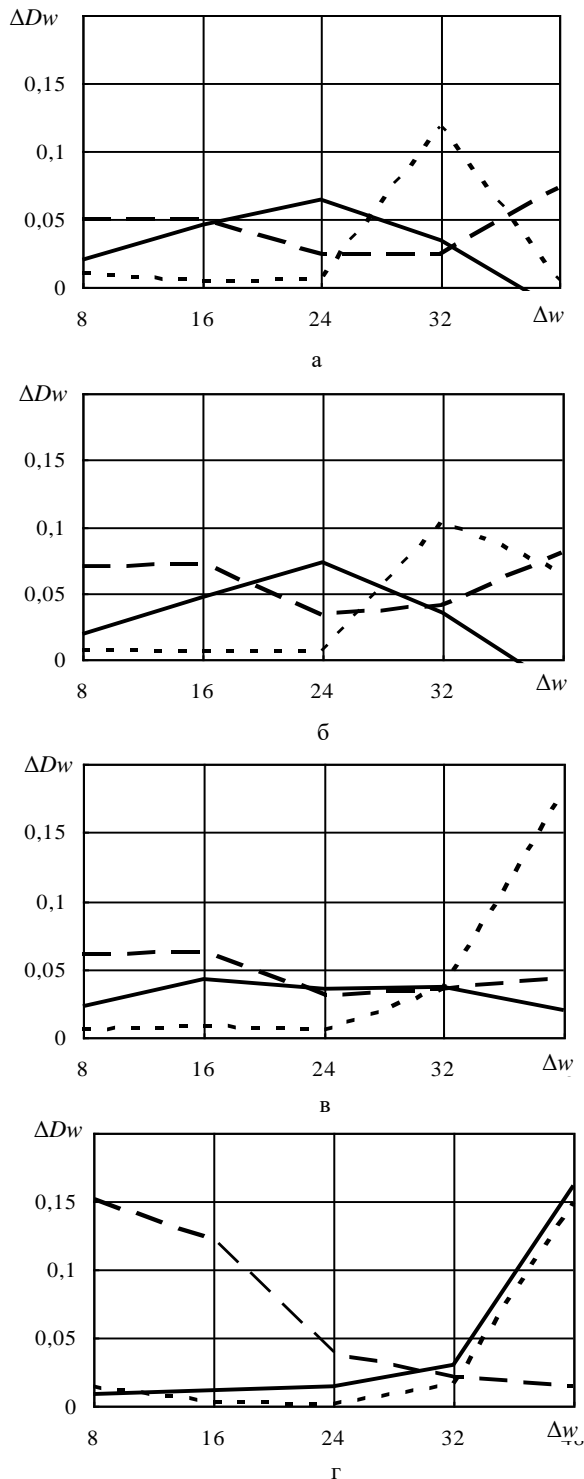


Рис. 4. Залежність різниць мінімальних, максимальних і середніх фрактальних розмірностей від розмірів «вікна»: 29.07.2018 (а), 05.08.2018 (б), 08.08.2018 (в) і 10.08.2018 (г)

На рис. 4, в (точкова лінія) при таких розмірах «вікна» спостерігається екстремум різниць максимальних фрактальних розмірностей. Хвиловий характер зміни різниць середніх фрактальних розмірностей (суцільна лінія на рис. 4, в) може характери-

зувати наявність шаруватої структури на космічному знімку.

Зовсім інша структура підстільної поверхні спостерігається на рис. 2, г, на якому видно, що світлі ділянки зменшують не тільки за товщиною, а і за довжиною, і розміщуються тільки в одному місці космічного знімка – у лівому нижньому куті. На рис. 4, г видно, що зміна розмірів світлих і темних ділянок підстільної поверхні на космічному знімку приводить до зміни всіх різниць фрактальних розмірностей. Різниці мінімальних фрактальних розмірностей (штрихова лінія) мають екстремум при розмірах «вікна» 8×8 пікселів і велике значення при розмірі «вікна» 16×16 пікселів. Така поведінка різниць мінімальних фрактальних розмірностей обумовлена зменшенням довжини світлих ділянок на знімку до 16 пікселів. Характер змін різниць максимальних (точкова лінія) і середніх (суцільна лінія) фрактальних розмірностей практично однаковий. Спочатку зазначені різниці практично не змінюються, а потім при розмірах «вікна» 32×32 пікселя починають збільшуватися і мають екстремальні значення при розмірі «вікна» 48×48 пікселів. Такі значення розмірів «вікна» відповідають розміру темної ділянки на космічному знімку (див. рис. 2, г).

Таким чином, використання під час фрактального аналізу «вікон» різного розміру дає змогу визначити розміри різних аномальних структур на космічному знімку за рахунок зміни різниць мінімальних, максимальних і середніх фрактальних розмірностей.

Висновки

У теперішній час сільськогосподарські роботи виконуються з високою динамікою і оцінка їх результатів потребує постійного моніторингу. Для отримання інформації про стан і структуру земельних ділянок та посівних площ і виявлення ділянок землі, що мають ерозійні порушення, а також інші види деградації землі широко застосовуються дані ДЗЗ. Методи фрактального аналізу зображень все частіше застосовують для підвищення інформативності космічних знімків під час моніторингу земної поверхні. Під час застосування таких методів будуються поля фрактальних розмірностей і у подальшому проводиться їх оброблення і дослідження. При цьому використовуються космічні знімки в одному діапазоні хвиль.

Розглянута можливість застосування фрактального аналізу для визначення розмірів ділянок поля на яких проводяться сільськогосподарські роботи з використанням «вікон» різних розмірів. Поступове збільшення, а потім зменшення різниць середніх фрактальних розмірностей під час збільшенні розмірів «вікна» характеризує наявність світлих і темних ділянок на космічному знімку, що обумовлені проведенням сільськогосподарських робіт. За зміною різниць мінімальних фрактальних розмірностей можна оцінити розміри світлих ділянок на космічному знімку, а за зміною різниць максимальних фрактальних розмірностей – темних ділянок.

Під час подальших досліджень, доцільно здійснити оцінку впливу величини стрибка, що бере уч-

асть у побудові поля фрактальних розмірностей, на величини мінімальних, максимальних і середніх значень фрактальних розмірностей.

іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lilian Yang, Bing Lu, Margaret Schmidt et al. Applications of remote sensing for crop residue cover mapping. Smart Agricultural Technology. 2025. Vol. 11. P. 1 – 14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100880>.
2. Тараріко О.Г., Сиротенко О.В., Ільєнко Т.В., Кучма Т.Л. Агроекологічний супутниковий моніторинг. К.: Аграр. наука, 2019. 204 с. URL: <https://agroeco.org.ua/vydannya/agroekologichnij-suputnikovij-monitoring/>
3. ESA Sentinel Online, Spatial Resolution. ESA Sentinel Online URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial> .
4. Feder J. Fractals. New York: Springer US, 1988. 263 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2124-6>.
5. Іванов В.К., Кучук Г.А., Пашенко Р.Е. Фрактальний аналіз процесів, структур і сигналів / Під. ред. Р.Е. Пашенко. Х.: Екоперспектива, 2006. 348 с. URL: <https://nvd-nanu.org.ua/ae7f7065-2b48-46b5-bce8-45b8cd753cdd/>
6. Марюшко М.В., Пашенко Р.Е. Фрактальний аналіз космічних знімків SENTINEL-2 для моніторингу сільськогосподарських культур. РЕІКС. 2020. №4(96). С. 34 – 47. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2020.4.03>.
7. Пашенко Р.Е., Марюшко М.В. Оцінка стану різних сільськогосподарських культур з використанням фрактального аналізу. Сучасні інформаційні системи. 2023. Том. 7, № 3. С. 81 – 88. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.12>.
8. Пашенко Р.Е., Марюшко М.В. Моніторинг змін стану сільськогосподарських земель за даними фрактального аналізу космічних знімків. Системи управління, навігації та зв'язку. 2021. Вип. 3(65). С. 8 – 17. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.3.008>.
9. Марюшко М.В., Пашенко Р.Е., Коблюк Н.С. Моніторинг сільськогосподарських культур із застосуванням космічних знімків SENTINEL-2. Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2019. №1(89). С. 99 – 108. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2019.1.11>.
10. Crownover R.M. An Introduction to Fractals and Chaos. London: Jones and Bartlett Publishers, Inc, 1995. 352 p. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA210257.pdf>

Received (Надійшла) 18.10.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 14.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ ABOUT THE AUTHORS

Пашенко Руслан Едуардович – доктор технічних наук, професор, старший науковий співробітник відділу дистанційного зондування Землі, Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України, Харків, Україна;

Ruslan Pashchenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior research scientist of Department remote sensing of the Earth, O.Ya. Usikov Institute for Radio physics and Electronics of the NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine,

e-mail: r.paschenko@i.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-6218-0324>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58126357500>.

Марюшко Максим В'ячеславович – асистент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна,

Maksim Mariushko – Teaching Assistant of Dept. of Geo-information Technologies and Space Monitoring of the Earth, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine,

e-mail: max.maryushko@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3743-8535>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57203139152&origin=resultlist>.

Estimation anomalies sizes on spaces pictures of agricultural earths with the use fractals dimensions

Ruslan Pashchenko, Maxim Mariushko

Abstract. In the present terms agricultural works are executed with a high dynamics and estimation their results needs permanent monitoring. The **subject** of the study in the article is estimation possibility determination of sizes anomalous areas of the field on spaces pictures with the use fractals dimensions that settle accounts in the different sizes of «windows». The **object** of the study are agricultural earths on which works were conducted and which are fixed on the spaces pictures of satellite Sentinel-2. The **goal** is estimation influencing «window» extents on the sizes of fractals dimensions spaces pictures of agricultural earths during their monitoring and determination sizes of anomalous areas. **The following results were obtained.** It is investigational influencing «window» extents, which takes part in construction the field of fractals dimensions, on the sizes minimum, maximal and mean values of fractals dimensions, which are on the spaces pictures agricultural earths which works behaved on. Gradual increase, and then diminishing differences middle fractals dimensions under time jumboizing «window» characterizes the presence light and dark areas on a space picture, that is conditioned by the leadthrough of agricultural works. After the change differences minimum fractals dimensions can be estimated sizes of light areas on a space picture, and after the change differences maximal fractals dimensions – dark areas. **Conclusions.** The use during the fractal analysis «windows» of different size allows to determine sizes different anomalous structures on a space picture due to the change differences minimum, maximal and middle fractals dimensions.

Keywords: monitoring the state of agricultural earths, space pictures, fractal dimension, anomalous area.

Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 623.746.2

doi: 10.26906/SUNZ.2026.1.012

Д. О. Галінський

Українська державна льотна академія, Кропивницький, Україна

МОДЕЛІ ТА МЕТОД ПЛАНУВАННЯ РУХУ РОЮ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПРИ ВИКОНАННІ СПЕЦІАЛЬНИХ МІСІЙ З УРАХУВАННЯМ ПРІОРИТЕТУ ЗАВДАНЬ

Анотація. Актуальність. В статті наведено удосконалений автором метод планування руху рою безпілотних літальних апаратів (БпЛА) при виконанні спеціальних місій з урахуванням пріоритету завдань в складному середовищі, який перевершує відомі методи за швидкістю та точністю конвергенції та часом виконання. **Об'єкт дослідження** процеси застосування роїв безпілотних літальних апаратів при виконанні спеціальних місій **Мета статті:** удосконалення методу планування руху рою безпілотних літальних апаратів при виконанні спеціальних місій з урахуванням пріоритету завдань в складному середовищі. **Результати дослідження.** У статті для удосконалення методу планування руху БпЛА введено двоетапність планування шляху. В якості базового методу для удосконалення використано метод рою часток (PSO), який зарекомендував себе як достатньо ефективний алгоритм рішення схожих завдань. На першому етапі метод ініціює траєкторії польоту БпЛА та призначає пріоритети БпЛА зі складу рою на основі факторів навколишнього середовища та завдань місії. На другому етапі окремі БпЛА з високим пріоритетом використовують алгоритм PSO, що ґрунтується на відомому методі швидкого дослідження випадкового дерева, для планування шляху, тоді як початковий рій частинок вибірково успадковує результати попередньої ініціалізації. Оскільки траєкторії польоту БпЛА, згенеровані таким методом, можуть не відповідати фактичним вимогам до польоту рою БпЛА, використано криві Дубінса для згладжування та отримання фактичних траєкторій польоту у відповідності з пріоритетністю завдань спеціальної місії. **Висновки.** Запропонований гібридний підхід поєднує ініціалізацію траєкторій методом випадкових дерев (RRT) з оптимізацією роєм частинок (PSO), що дозволяє ефективно оминати локальні оптимуми у складних середовищах. Використання функції штрафів для дотримання безпечних дистанцій у поєднанні зі стратегією перезапуску та збереженням «елітних» станів забезпечує швидку збіжність і високу стійкість алгоритму. Експериментально доведена масштабованість методу на групи до п'ятисот БпЛА підтверджує його застосування для виконання спеціальних місій в умовах високої щільності агентів і динамічних обмежень.

Ключові слова: авіаційний транспорт, безпілотний літальний апарат, генетичні алгоритми, інформаційні технології, навігація, планування маршрутів руху, транспортні технології, штучний інтелект.

Вступ

Постановка проблеми. Управління БпЛА можна класифікувати і розділити на 3 основні категорії:

а) Дистанційне керування пілотом – статична автоматизація оператора, коли всі рішення приймаються дистанційним оператором.

б) Віддалене контрольоване управління – адаптивна автоматизація. Воно дає дронам можливість запускати і виконувати заданий процес незалежно один від одного, з можливістю втручання людини, якщо це необхідно. в) Повне автономне управління – системна статична автоматизація, коли дрони можуть приймати всі необхідні рішення для успішного завершення місії без необхідності втручання людини. На теперішній час завдання управління БпЛА можна розділити на три типи: керування одиночним БпЛА, керування БпЛА у складі групи, керування роєм.

Перший тип: зовнішні оператори мають повний контроль над БпЛА. Автоматичні процеси відповідають за стандартизовані операції. Параметри руху, параметри навігації, параметри технічного обслуговування та планування місії контролюються людиною. Цей тип БпЛА не має високого рівня автономності.

Другий тип включає керування групою БпЛА. Ці БпЛА можуть об'єднуватися в групи, і кілька осіб

повинні керувати ними разом. Цей вид діяльності спрямований на зміну ролі людини з пілота, штурмана, на командира. Такі групи БпЛА працюють наступним чином:

1) БпЛА мають незалежні завдання, але працюють у спільному повітряному просторі;

2) БпЛА об'єднані у структуру, але всередині структур автономна взаємодія здійснюється лише частково;

3) БпЛА об'єднані в рій (поводяться як структури, змодельовані за природними процесами, мають високу інтеграцію та взаємодію).

Третій тип. Управління роєм є найбільш складним науковим завданням, яке знаходиться на стику робототехніки, інформаційних технологій, штучного інтелекту, навігації та транспортних технологій.

Удосконалений автором метод розподілу завдань в рою БпЛА при виконанні спеціальних місій [1] дозволяє визначити пріоритет завдань і закріпити завдання за конкретними БпЛА однак не дає відповідь на питання як спланувати оптимальним чином маршрути польотів, враховуючи динамічно мінливі складні середовища польоту, забезпечуючи вимоги до безпеки польотів та пріоритетність завдань.

В якості базового методу для удосконалення використовуємо метод рою часток, який зарекомендував

себе як достатньо ефективний алгоритм рішення схожих завдань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найпоширенішим методом планування траєкторії руху роїв БпЛА серед алгоритмів, аналоги яких зустрічаються у живій природі, у спеціальній літературі визначено ParticleSwarmOptimization (PSO). Даний метод відомий простотою та ефективністю. Значна кількість дослідників, використовуючи метод PSO якості базового удосконалює його. Так, в роботі [2] розроблений розширений алгоритм оптимізації дискретного рою частинок (DPSO) для вирішення завдання комівозера.

Розподілений алгоритм дослідження на основі PSO для вирішення часткових завдань в сценаріях катастроф наведений у роботі [3]. В статті [4] наведено оптимізацію параметрів, що впливають на продуктивність алгоритму PSO, з метою зменшення втрат ефективності та виникнення субоптимальних рішень.

Однак у існуючих дослідженнях використання методу PSO для планування траєкторії кількох БпЛА все ще має такі проблеми:

а) при наявності в навколишньому середовищі значної кількості перешкод, особливо у гірській місцевості, урбанізованій місцевості, заводських забудовах еволюційним алгоритмам важко знайти можливе рішення;

б) обмеження спільної роботи кількох БпЛА зі складу рою. Через численні обмеження щодо уникнення зіткнень у стиснутому просторі, БпЛА зі складу рою (як у алгоритмі розглядаються у вигляді частинок) важко оновити свої траєкторії до поточного оптимального напрямку, що призводить до труднощів у конвергенції під час процесу оптимізації.

в) проблема потрапляння до локального оптимуму.

Дані проблеми вирішуються шляхом удосконалення методу.

Метою роботи є удосконалення методу планування руху рою безпілотних літальних апаратів при виконанні спеціальних місій з урахуванням пріоритету завдань в складному середовищі.

Основний матеріал

Для удосконалення відповідного методу введено двохетапність планування шляху. На першому етапі метод ініціює траєкторії польоту БпЛА та призначає пріоритети БпЛА. На другому етапі окремі БпЛА з високим пріоритетом використовують алгоритм PSO для планування шляху, тоді як початковий рій частинок вибірково успадковує результати попередньої ініціалізації.

Визначимо набір оптимальних або субоптимальних маршрутів польоту від початкової точки до пункту призначення, забезпечуючи при цьому вимоги безпеки. Ці маршрути розроблені для кількох БпЛА зі складу рою. Безпека означає здатність БпЛА успішно уникати перешкод у складних умовах зовнішнього середовища при виконанні спеціальних місій та запобігати зіткненням між собою.

Позначимо середовище польоту БпЛА як E , кількість БпЛА у складі рою N , кількість завдань K .

Кожен БпЛА рухається зі швидкістю v_i . Для кожного i -го БпЛА $i=[1..N]$, його конкретне j -те завдання зі складу плану a_j включає початкову точку виконання завдання $x_{s_{ij}}$ та кінцеву точку $x_{g_{ij}}$. Розіб'ємо шлях від початкової точки до кінцевої точки на ділянки траєкторії, що визначаються точками P^i :

$$P^i = \{p_1^i, p_2^i, \dots, p_w^i\}, \quad (1)$$

де $p_w^i \in w$ – ою точкою маршруту i –го БпЛА, що також визначає й відповідну ділянку руху. Тоді $W_i = |P^i|$ визначає кількість елементів маршруту руху i –го БпЛА.

Вочевидь, що $p_1^i = x_{s_i}$; $p_w^i = x_{g_i}$.

Необхідно визначити такий набір шляхів L , щоб досягалася цільова функція:

$$L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K l_{ij} \rightarrow \min \quad (2)$$

при системі обмежень.

Введемо відповідну систему обмежень, яка у загальному випадку буде реалізовуватися на визначенні вартості елементів руху БпЛА зі складу рою та відповідати загально визначеному підходу у формуванні системі “штрафів”. Для визначення штрафів введемо деяку систему показників. В цій системі нижній індекс відповідає наступному фізичному обмеженню.

Штраф довжини польоту – обмеження “1”.

Розіб'ємо траєкторію польоту БпЛА на кілька вузлів і підсумовуємо довжини траєкторії польоту, обчислюючи відстані між вузлами. Формула для розрахунку довжини шляху i -го БпЛА виглядає так:

$$F_1^i = \sum_{w=1}^{W_i-1} |P_w^i P_{w+1}^i|, \quad (3)$$

де довжина вектору визначається за відомою формулою [5]:

$$|P_w^i P_{w+1}^i| = \sqrt{(x_{(w+1)}^i - x_w^i)^2 + (y_{(w+1)}^i - y_w^i)^2 + (z_{(w+1)}^i - z_w^i)^2}. \quad (4)$$

де права частина рівняння визначає координати вузлів.

Штраф безпеки маршруту польоту – обмеження “2”.

Під час виконання місії БпЛА повинен враховувати безпеки, пов'язані з перешкодами для забезпечення безпеки польоту. При аналізі обмежень польоту перешкоди зазвичай моделюються у вигляді циліндрів, і ризик безпеки зростає зі зменшенням відстані до центру циліндра. Показником загрози для БпЛА можна вважати її ступінь.

Ступінь загрози для БпЛА розрахуємо за такою формулою:

$$F_2^w = \sum_{w=1}^{W_i-1} \sum_{q=1}^Q E_q |P_w^i P_{w+1}^i| \quad (5)$$

де E_q є ступінь загрози q -ої перешкоди на відрізку шляху $p_w^i p_{w+1}^i$.

Розрахунок E_q заснований на відносній відстані d_q між БПЛА та перешкодою так:

$$E_q = \begin{cases} 0, \text{ якщо } d_q > S_q + R_q; \\ (S_q + R_q) - d_q, \text{ якщо } R_q < d_q \leq S_q + R_q; \\ \infty, \text{ якщо } d_q \leq R_q, \end{cases} \quad (6)$$

де S_q позначає безпечну дистанцію (зона, в якій забезпечується відсутність зіткнення перешкоди й БПЛА); R_q – циліндричний радіус q -ої перешкоди; Q – загальна кількість перешкод.

Штраф небезпеки висоти на маршруті польоту – обмеження “3”.

Висота польоту БПЛА зазвичай обмежується нижнім та верхнім рівнем.

Формула для розрахунку показника висоти, який враховується при визначенні оптимальності маршруту виглядає так:

$$F_3^w = \sum_{w=1}^W H^w; \quad (7)$$

$$H^w = \begin{cases} \left| h^w - \frac{h_{max}^w - h_{min}^w}{2} \right|, & h_{min}^w \leq h^w \leq h_{max}^w, \\ \infty, & \text{в іншому випадку} \end{cases} \quad (8)$$

де H^w є показником обмеження висоти; h^w – поточна висота БПЛА на w -ій ділянці руху; h_{min}^w , h_{max}^w – мінімальне та максимальне обмеження висоти на w -ій ділянці відповідно.

Штраф згладжування траєкторії на маршруті польоту – обмеження “4”.

Для розрахунку показника “штрафу”, пов’язаного з потребою згладжування траєкторії для БПЛА на визначеній ділянці маршруту руху, необхідно визначити кути повороту:

$$\varphi_i^w = \arctg \left(\frac{\overrightarrow{p_w^i p_{w+1}^i} \times \overrightarrow{p_{w+1}^i p_{w+2}^i}}{p_w^i p_{w+1}^i \cdot p_{w+1}^i p_{w+2}^i} \right). \quad (9)$$

Формула для визначення кута набору висоти БПЛА має вигляд:

$$\varphi_i^w = \arctg \left(\frac{z_{(w+1)}^i - z_w^i}{p_w^i p_{w+1}^i} \right). \quad (10)$$

Тоді показник має вигляд:

$$F_4^w = a_1 \sum_{w=1}^{w-2} \varphi^w + a_1 \sum_{w=1}^{w-1} |\varphi^w - \varphi^{w-1}|, \quad (11)$$

де α_1 та α_2 вагові коефіцієнти складових показника, що відповідають умові $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$.

Штраф безпечної дистанції між БПЛА – обмеження “5”.

Позначимо $d(m_1, m_2)$ як відстань між m_1 та m_2 БПЛА зі складу рою. Позначимо $S_{m_1 m_2}$ як безпечну дистанцію між m_1 та m_2 БПЛА, виходячи з їх функціонального призначення та умов виконання місії. Тоді обмеження має вигляд:

$$F_5^w = \sum_{i=1}^N F_i^w; \quad (12)$$

$$F_i^w = \begin{cases} 0, \text{ якщо } d(m_1, m_2) \geq S_{m_1 m_2}; \\ \infty, \text{ в іншому випадку.} \end{cases} \quad (13)$$

Перетворення обмежень застосування БПЛА зі складу групи у функцію штрафів дозволяє кількісно оцінити ефективність їх шляхів на основі значення цієї функції. Перетворення обмежень траєкторії руху БПЛА у функцію витрат дозволяє кількісно оцінити якість їхніх шляхів на основі значення цієї функції:

$$F = \sum_{w=1}^W \sum_{\eta=1}^5 \beta_1 F_\eta^w, \quad (14)$$

де β_η – є ваговий коефіцієнт обмеження η , яких у статті введено п’ять (3), (5), (7), (11), (13).

Етап удосконаленого методу планування руху рою БПЛА при виконанні спеціальних місій використовує відомий метод пріоритетного планування місії БПЛА зі складу рою на основі факторів навколишнього середовища та завдань місії [1]. Додатково БПЛА з низьким пріоритетом виконання завдань повинні забезпечувати відсутність зіткнень з БПЛА з високим пріоритетом для виконання вимог безпеки польотів рою.

Оптимізації рою частинок є інтелектуальним методом оптимізації, який імітує поведінку природного біологічного рою, представляючи ефективну стратегію пошуку та є базовим для даного дослідження. Відповідно до даного методу кожна “частинка” є потенційним рішенням у просторі пошуку, оновлюючи свою швидкість і положення на основі еволюційних найкращих позицій як окремої особи, так і рою. Так кожна частинка відстежує своє власне історичне найкраще положення (індивідуальне оптимальне рішення, що позначимо p_b) та еволюційне найкраще положення всього рою (глобальне оптимальне рішення, що позначимо як g_b). Оновлення швидкості та положення частинок ґрунтуються на цих двох оптимальних рішеннях, що гарантує, що процес пошуку рухається за напрямом підвищення ефективності. Відповідні формули виглядають так:

$$v_i^{(k+1)} = \omega v_i^k + c_1 r_1 (p_{bi}^k - x_i^k) + c_2 r_2 (g_{bi}^k - x_i^k); \quad (15)$$

$$v_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1},$$

де вектор x представляє собою положення, вектор v швидкість i -ої частинки (i – ої БПЛА зі складу рою відповідно). Параметри c_1 та c_2 – коефіцієнти прискорення, які впливають на рух частинок та враховують індивідуальний та соціальний їх досвід. Змінні r_1 та r_2 є рівномірно розподіленими випадковими числами у діапазоні $[0,1]$. Парметр ω позначає інерційну вагу, яка використовується для збалансування локальних й глобальних пошукових

можливостей частинок. $p_{b_i}^k$ – це індивідуальне оптимальне положення i -го БПЛА зі складу рою при ітерації k , а g_b – глобальне оптимальне положення всього рою.

Другий етап удосконаленого методу планування руху рою БПЛА при виконанні спеціальних місій ґрунтується на відомому методі швидкого дослідження випадкового дерева. Даний метод забезпечує швидке дослідження неопуклих просторів високої розмірності шляхом випадкової побудови дерева, що заповнює простір.

Після ініціалізації стартової x_{s_i} та цільової точок x_{g_i} метод починає роботу з випадкового вибору точки V_{rand} із заданого простору E . Далі шукається в побудованому дереві вузол, найближчий до V_{rand} , називається V_{nearr} . Далі метод рухається за напрямком від V_{rand} до V_{nearr} за заздалегідь визначеним розміром кроку, що генерує новий вузол V_{new} . Після генерації V_{new} , метод виконує перевірку на зіткнення, щоб переконатися, що новий вузол не розташований у зоні перешкоди. Якщо перевірку на зіткнення пройдено, V_{nearr} встановлюється як первинний вузол до V_{new} .

У подальшому метод знову виявляє всі вузли, які потенційно можуть бути батьківськими V_{new} у діапазоні з центром в V_{rand} , з попередньо визначеним розміром кроку δ як деякого радіусу. Якщо існує вузол, який є кращим батьком, ніж поточний, тобто шлях до цього вузла коротший, ніж шлях до поточного батьківського вузла, то батьківський вузол V_{new} змінюється.

Далі метод проходить процес, який називається повторним підключенням. Під час цього процесу перевіряються всі вузли у межах радіусного діапазону. Якщо шлях через V_{new} коротший за шлях до поточного батьківського вузла, тоді батьківський вузол встановлюється на V_{new} .

Ґрунтуючись на удосконаленому [1] методі розподілу завдань в рою при виконанні спеціальних місій, визначимо пріоритетність БПЛА у рою та застосуємо метод пріоритетного планування маршрутів. Метод пріоритетного планування виконує планування траєкторії відповідно до пріоритету серед БПЛА. При формуванні траєкторій руху БПЛА траєкторії з більш високим пріоритетом встановлюються як перешкоди для уникнення зіткнень між БПЛА тим самим забезпечуючи максимізацію ефективності рою.

Розкриємо сутність удосконаленого методу. Вважаючи складність завдання побудови маршрутів декількох БПЛА застосуємо дворівневу стратегію планування шляху для ефективного розв'язання задачі та зменшення її складності. Загальна структура удосконаленого методу складається з двох частин: першого рівня та другого рівня. Схема методу наведена на рис. 1.

Перший рівень методу полягає у ініціалізації траєкторії БПЛА за допомогою відомого методу оптимізації рою часток, забезпечуючи початковий орієнтир для подальшого планування. Потім виконується призначення пріоритетів і вводиться стратегія

перезапуску, щоб адаптуватися до складних середовищ і уникнути локального оптимуму. Після кожної ітерації планування шляху пріоритети перерозподіляються, а планування повторюється для пошуку кращого рішення. БПЛА з найвищим пріоритетом заходить на другий рівень для більш точного планування шляху з урахуванням подолання перешкод та забезпечення безпечної навігації рою.

На другому рівні під час кожного циклу ітерації виконується ряд операцій, включаючи планування шляху, виявлення зіткнень та оновлення списку перешкод. Планування шляху досягається шляхом успадкування шляхів, ініціалізованих методом рою часток, і попереднього покоління роїв часток «перезапуску», з подальшою їх оптимізацією за допомогою методу випадкових дерев. Таким чином, удосконалений метод інтегрує переваги методів ініціалізації рою часток та випадкових дерев з урахуванням пріоритетності розподілу завдань серед БПЛА зі складу рою для виконання спеціальної місії. Він використовує можливості глобального пошуку для визначення потенційних місць розташування загального оптимального рішення, а також використовує потужні можливості локальної оптимізації алгоритму для точного налаштування рішень. Результатом цієї інтеграції є ефективні та високоякісні рішення для планування шляху. Під час процесу планування шляху другий рівень виконує виявлення зіткнень із глобальним списком перешкод, щоб гарантувати, що згенеровані шляхи є безпечними та надійними. Як тільки планування шляху завершено, оптимізований шлях оновлюється в глобальному списку перешкод. Це дозволяє ефективно використовувати цю інформацію в подальших процесах планування, тим самим підвищуючи ефективність як планування шляху, так і виявлення зіткнень.

Вибір координат при плануванні маршрутів має вирішальне значення для еволюційних алгоритмів. В існуючих еволюційних алгоритмах ці точки шляху зазвичай представляються у вигляді тривимірних координат в декартових координатах [6], полярних координатах [5]. Використання декартових координат для представлення точок шляху дозволяє проводити кращі операції рандомізації, тому у дослідженні вибрані декартові координати.

При ініціалізації траєкторій метод випадкових дерев здатний генерувати попередні траєкторії польоту для окремих БПЛА. Він досліджує та знаходить можливу траєкторію, будуючи деревоподібну структуру, яка починається з початкової точки та поступово розширюється до цільової області. Метод не тільки зосереджується на швидкій генерації контурів, але й оптимізує якість траєкторій шляхом перепідключення існуючих сегментів, щоб гарантувати, що згенеровані шляхи є відносно оптимальними. Оскільки траєкторії польоту БПЛА, згенеровані таким методом, можуть не відповідати фактичним вимогам до польоту множини БПЛА, використаємо криві Дубінса для згладжування та отримання фактичних траєкторій польоту. В статті не будемо розкривати відомі методи, а лише зробимо відповідні посилання [7] на базову теорію.

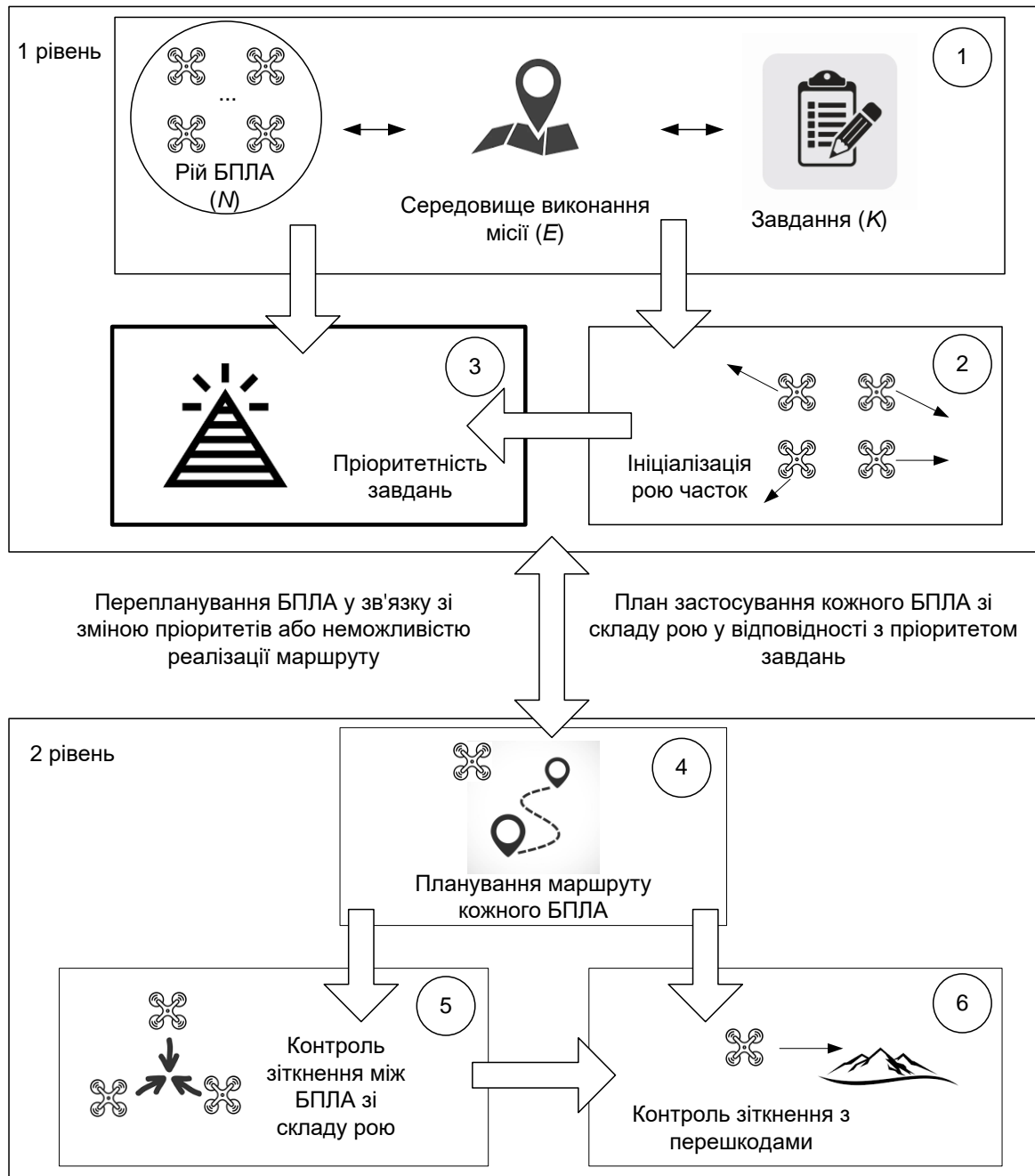


Рис. 1. Схема удосконаленого методу

Після згладжування Дубінса отримана траєкторія відповідає обмеженням продуктивності БПЛА й може бути використана для організації польоту у відповідності з пріоритетністю завдань спеціальної місії.

Висновки

Таким чином, використання методу випадкових дерев для ініціалізації траєкторії БПЛА може забезпечити попереднє та ефективне розуміння для подальшого розподілу пріоритетів. Такий підхід підвищує ефективність пошуку та якість методу ініціалізації рою часток, одночасно знижуючи ризик потрапити в пастку локального оптимуму. Цей метод демонструє значну гнучкість і застосовність при роботі зі складними середовищами та обмеженнями.

З урахуванням того, що спеціальні місії роїв БПЛА виконуються у складних умовах зовнішнього середовища, з метою адаптації до складних умов та уникання потрапляння траєкторій БПЛА в локальний оптимум застосуємо стратегію перезапуску у призначенні пріоритетів БПЛА.

Після кожної ітерації перезапуску для повного використання результатів попереднього рішення зберігаємо стани деяких частинок з попередньої ітерації для полегшення швидкої конвергенції.

З іншого боку, для підтримки різноманітності частинок метод також вводить деякі випадкові частинки на цій основі. Вони збільшують простір дослідження та допомагають алгоритму уникнути локальних оптимальних рішень. Експериментальні результати в чотирьох сценаріях з роєм у складі сорока

БПЛА демонструють кращу продуктивність. Масштабність рою досліджувалось для рою з п'ятисот БПЛА, що дозволяє зробити висновок про масштабованість методу на значні розміри задачі виконання спеціальних місій.

Використання засобів штучного інтелекту

Автор підтверджує, що не використовував технології штучного інтелекту при створенні представленної роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Галінський, Д. Динамічний метод розподілу завдань в рою БПЛА при виконанні спеціальних місій. *Випробування та сертифікація*, 2025, 3(9), 87-94. <https://doi.org/10.37701/ts.09.2025.11>
2. Phung, M.D.; Quach, C.H.; Dinh, T.H.; Ha, Q. Enhanced discrete particle swarm optimization path planning for UAV vision-based surface inspection. *Autom. Constr.* 2017, 81, 25–33. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.04399>
3. Sánchez-García, J.; Reina, D.; Toral, S. A distributed PSO-based exploration algorithm for a UAV network assisting a disaster scenario. *Future Gener. Comput. Syst.* 2019, 90, 129–148. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.07.048>
4. Wu, X.; Bai, W.; Xie, Y.; Sun, X.; Deng, C.; Cui, H. A hybrid algorithm of particle swarm optimization, metropolis criterion and RTS smoother for path planning of UAVs. *Appl. Soft Comput.* 2018, 73, 735–747. <https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2018.09.011>
5. Rakha, T.; Gorodetsky, A. Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones. *Autom. Constr.* 2018, 93, 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.002>
6. Pasha, J.; Elmi, Z.; Purkayastha, S.; Fathollahi-Fard, A.M.; Ge, Y.E.; Lau, Y.Y.; Dulebenets, M.A. The drone scheduling problem: A systematic state-of-the-art review. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2022, 23. URL: <https://www.ieee.org/publications/rights/index.html>
7. Dubins, L. On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents. *Am. J. Math.* 1957, 79, 497–516. <https://doi.org/10.2307/2372560>
8. Foudeh, H.A.; Luk, P.C.K.; Whidborne, J.F. An advanced unmanned aerial vehicle (UAV) approach via learning-based control for overhead power line monitoring: A comprehensive review. *IEEE Access* 2021, 9, 130410–130433. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3110159>
9. Goel, U.; Varshney, S.; Jain, A.; Maheshwari, S.; Shukla, A. Three Dimensional Path Planning for UAVs in Dynamic Environment using Glow-worm Swarm Optimization. *Procedia Comput. Sci.* 2018, 133, 230–239. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.028>
10. Gohari, A.; Ahmad, A.B.; Rahim, R.B.A.; Supa'at, A.S.M.; Abd Razak, S.; Gismalla, M.S.M. Involvement of surveillance drones in smart cities: A systematic review. *IEEE Access* 2022, 10, 566–598. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3177904>

Received (Надійшла) 22.12.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Галінський Дмитро Олександрович – аспірант, Українська державна льотна академія, Кропивницький, Україна;
Dmytro Galinskyi – Postgraduate student, Ukraine State Flight Academy, Kropyvnytskyi, Ukraine;
 e-mail: galinskyid@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-0385-9323>.

Models and method of planning the motion of a swarm of UAVs when performing special missions taking into account the priority of tasks

Dmytro Galinskyi

Abstract. Relevance. The article presents a method for planning the movement of a swarm of unmanned aerial vehicles (UAVs) improved by the author when performing special missions, taking into account the priority of tasks in a complex environment, which surpasses known methods in terms of speed and accuracy of convergence and execution time. **Object of research:** processes of using swarms of unmanned aerial vehicles when performing special missions. **Purpose of the article:** improving the method of planning the movement of a swarm of unmanned aerial vehicles when performing special missions, taking into account the priority of tasks in a complex environment. **Research results.** In the article, a two-stage path planning method is introduced to improve the UAV movement planning method. The particle swarm optimization (PSO) method, which has proven to be a fairly effective algorithm for solving similar tasks, is used as the basic method for improvement. In the first stage, the method initiates UAV flight trajectories and assigns priorities to UAVs from the swarm based on environmental factors and mission tasks. In the second stage, individual UAVs with high priority use the PSO algorithm, which is based on the well-known fast random tree exploration method, for path planning, while the initial particle swarm selectively inherits the results of the previous initialization. Since the UAV flight trajectories generated by this method may not meet the actual flight requirements of the UAV swarm, Dubins curves are used to smooth and obtain actual flight trajectories in accordance with the priority of the special mission tasks. **Conclusions.** The proposed hybrid approach combines trajectory initialization using the random tree method (RRT) with particle swarm optimization (PSO), which allows for effective bypassing of local optima in complex environments. The use of a penalty function to maintain safe distances in combination with a restart strategy and preservation of “elite” states ensures fast convergence and high stability of the algorithm. The experimentally proven scalability of the method to groups of up to five hundred UAVs confirms its application for performing special missions in conditions of high agent density and dynamic constraints.

Keywords: air transport, unmanned aerial vehicle, genetic algorithms, information technology, navigation, route planning, transportation technology, artificial intelligence.

О. Г. Дрючко, О. В. Шефер, С. Г. Кислиця, Р. В. Захарченко, Б. Р. Боряк

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

РОЗРОБКА І АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНІЧНОГО ОСНАЩЕННЯ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ ШТАМПУВАННЯ

Анотація. Актуальність. Автоматизація виробничих процесів штампування залишається важливим завданням, особливо для дрібних і середніх штучних виробів із ускладненою геометрією та різними фізико-механічними властивостями. Традиційні механічні засоби завантаження та орієнтації заготовок не ефективні для таких виробів. Розробка гнучких роботизованих комплексів дозволяє скоротити ручну працю, підвищити продуктивність і надійність технологічного процесу. **Об'єкт дослідження:** технічне оснащення роботизованих комплексів штампування, включаючи накопичувальні пристрої, маніпулятори подачі заготовок, пресові установки та системи автоматичного управління технологічними операціями. **Мета статті:** розробка багатоцільового автоматизованого завантажувально-накопичуючого комплексу для поштучної подачі дископодібних заготовок, який інтегрується з універсальними одно-кривошипними пресами і забезпечує підвищену продуктивність та надійність процесу штампування. **Результати дослідження.** Розроблено автономний накопичувальний комплекс із бункером, похилим магазином, пневмоманіпулятором для подачі заготовок у штамп та пристроєм видалення виробів. Реалізовано ручний та автоматичний режими роботи, забезпечено блокування подачі деформованих заготовок та об'єктів із задирами, контроль завершення технологічного циклу та синхронізацію з пресом. Використання комбінованого впливу активних, пасивних та інформаційних елементів вузлів підвищує продуктивність, надійність та спрощує конструкцію. **Висновки.** Створено ефективний автоматизований комплекс для подачі дископодібних заготовок у роботизованих системах штампування. Комплекс дозволяє модернізувати існуюче обладнання без значних витрат, підвищує продуктивність та надійність технологічного процесу. Практична реалізація передбачає модифікацію вузлів під різні види заготовок та операцій, використання електронних датчиків та систем управління для забезпечення контролю і блокування.

Ключові слова: спеціальне оснащення, накопичувальний комплекс, штучне завантаження заготовок, роботизовані процеси штампування, автоматизація, інновації.

Вступ

Одним із важливих завдань автоматизації виробничих процесів штампування є організація автоматичного завантаження та орієнтація штучних заготовок. Це особливо важливо з позицій скорочення малопривабливої ручної праці і підвищення продуктивності технологічного обладнання.

Незважаючи на численні наукові і конструкторські розробки, ця проблема до цього часу не може вважатися повністю вирішеною для класу дрібних і середніх штучних виробів типу пластин з неявно вираженими конструкторськими ознаками (ключами орієнтації) і відмінними фізико-механічними властивостями (які виявляються, наприклад, у процесі транспортування металевих заготовок ковзанням унаслідок структурування і виникнення залишкової намагніченості поверхневого їх шару, у випадку використання заготовок із матеріалів заниженої жорсткості і міцності, ламкості тощо), оскільки до таких видів виробів неможливо застосувати традиційні засоби автоматизації операцій завантаження і орієнтування заготовок з механічними захопленнями. Їх проектування являє собою складну науково-технічну задачу, а пошук інноваційних рішень вимагає використання знань та досвіду, накопичених у зв'язку з необхідністю комплексного підходу до автоматизації окремих операцій з використанням промислових роботів у різних виробничих сферах. Можна виділити низку напрямків для їх практичної реалізації:

- інженерне вдосконалення універсального технологічного обладнання;

- модернізацію конструкції самої деталі (заготовки), яка повинна відповідати умовам обробки та забезпечувати захоплення, переміщення та точне позиціонування в межах робочого простору;

- внесення змін до технологічного процесу для кращої його адаптації до технічних можливостей існуючого або придбаного промислового робота;

- вибір пристроїв орієнтації деталей (слід зазначити, що вибір методу орієнтації деталей та вибір баз захоплення для транспортування тісно взаємопов'язані);

- вибір накопичувача для деталей (заготовок) (використання пристроїв зберігання заготовок скорочує витрати часу персоналу на підготовку робіт до роботи та дозволяє інтегрувати технологічне обладнання різної ефективності в єдиний цикл);

- виготовлення нового спеціалізованого або вузькоспеціалізованого обладнання (проекування та виготовлення такого додаткового обладнання, а також удосконалення самого технологічного обладнання, як правило, вимагають відносно небагато часу та можуть бути виконані власними силами виробника);

- розробка схеми компоновки, планування взаємного розміщення технологічного обладнання, роботів, панелей керування, механізмів завантаження, зон зберігання, контейнерів та транспортних засобів у суворій відповідності до технологічного

процесу виконання виробничих операцій та вимог до точності позиціонування;

– проектування та управління алгоритмом оброблення (цьому передують розробка технологічних процесів та розрахунків процесів (визначення режиму та часу обробки, визначення необхідного та можливого допоміжного та кінцевого часу, розрахунок оптимальних траєкторій та робочих швидкостей приводу робота, розрахунок циклів та циклограм, визначення місткості накопичувачів тощо)).

Відомі аналогічні рішення таких завдань реалізовані в сучасних комплексах обладнання для штампування виробів з використанням одноразового завантаження заготовок [1–7]. У вищезазначених роботах представлені дані про їх склад, структурну архітектуру, принцип роботи, технічні характеристики та можливості. Розгляд особливостей існуючих розробок дозволяє аналізувати та характеризувати їх з позиції аналогів при виборі та порівнянні конструктивних елементів, принципу роботи, конфігурації, типу взаємодії, давати їм оцінку з конструктивної, технологічної та економічної точки зору, уніфікуючи вузли та деталі тощо. Такі технологічні комплекси базуються на використанні магазинних, штабельних та бункерних типів накопичувальних пристроїв [8]. Аналіз їх компонування свідчить про існування кількох цільових вузлів, спільних для всіх трьох їх типів: джерело живлення, ємність для завантаження заготовок, пристрій їх уловлювання, проміжний накопичувальний пристрій, пристрій відсікання і скидання, активатор руху заготовок, маніпулятор подачі орієнтованих заготовок у зону штампування, функціональні приводи. Різноманітність розроблених конструкцій зумовлена варіаціями в компонуванні та способах реалізації цих зазначених пристроїв. Найпростішим варіантом технологічного комплексу є уніфікований прес, оснащений одним з типів подачі заготовок. Наразі зазвичай використовуються шибєрні затворні пристрої, обертові або грейферні завантажувачі, маніпулятори та промислові роботи [9, 10].

Такі розробки кінематично складні, характеризуються великою кількістю пар тертя і значною дисипацією енергії, мають обмежений ресурс дії і потребують проведення попередніх підготовчих й регламентних робіт, вимагають високої точності виготовлення складових компонентів та їх наступне налаштування з використанням спеціалізованого технологічного обладнання. У ряді випадків вони складні, дорогі за вартістю, передбачають обслуговування підготовленим персоналом. Їх недоліком є і те, що вони не можуть бути універсальними в силу існування широкої різноманітності й складності об'єктів виготовлення; широти спектру вирішуваних функціональних завдань, принципів і способів їхньої реалізації; використання матеріалів, що не повністю задовольняють усьому комплексу технічних і технологічних вимог, їх сумісності та інших чинників.

Розробка виробничих систем з метою підвищення надійності експлуатації та своєчасного забезпечення всіх елементів технологічного процесу включає використання досконалих модернізованих

систем для забезпечення їх функціонування. Водночас, досвід показує, що підвищення рівня автоматизації досягається значним ускладненням конструкцій та систем технологічного обладнання, а отже, збільшенням їх вартості. Тому необхідний рівень автоматизації має бути економічно виправданим.

Розширення сфер застосування роботизованих систем, поява компактних та одночасно потужних продуктивних засобів, розвиток технічних засобів автоматизації, елементної бази, схемотехніки та систем керування дозволяють використовувати вищий рівень проектування, впровадження нових технічних рішень, підходів та принципів роботи при створенні адаптованого спеціального технічного обладнання для підготовчих етапів конкретних промислових виробничих процесів, де використання традиційних засобів є недоцільним або не дозволяє технічно вирішити проблему в цілому. Такі проблеми вирішуються шляхом внесення конструктивно-технічних змін у транспортні маршрути, орієнтацію, сортування, вивантаження заготовок, виконавчі вузли, уловлювальні пристрої, оснащення останніх допоміжними зовнішніми інформаційними датчиками, що реагують на наявність об'єкта маніпуляції, його форму, розмір, вагу, стан поверхні, зусилля затискання, ковзання, позиціонування тощо.

Постановка завдання. Метою створення даного технологічного засобу є розроблення багатопільового завантажувально-накопичуючого автоматизованого комплексу для поштучної подачі дископодібних заготовок, що злагоджено працює у гнучкому виробничому роботизованому зв'язку з універсальними одно-кривошипними пресами та поєднує можливість його спряження з наявними технологічними обладнаннями сучасного машиновиробника, з найменшими переробками існуючого допоміжного оснащення, власними зусиллями у відповідності з виникаючими інноваційними тенденціями.

Результати роботи та їхнє обговорення

У роботі пропонується розгляд варіанту технічної реалізації автономного накопичуючого комплексу, що призначений для обслуговування пресів одно-кривошипних відкритих простої дії нормальним зусиллям до 250 кН, відповідно діючому стандарту ДСТУ 9408-89, і забезпечує одержання штапованих виробів (перфорованих деталей із заготовок у формі дисків) шляхом завантаження заготовок навалом в бункер-накопичувач, їхнє наступне орієнтування, сортування, поштучну видачу, синхронну з роботою пресу подачу у штамп, штампування (пробивання отворів) та виштовхування виробів із штампма. Виконання заданої послідовності операцій та злагоджене функціонування вузлів забезпечує електронний комплекс керування.

Приведена розробка (табл. 1) у цілому представляє сукупність функціонально зв'язаних засобів і пристроїв, конструктивно об'єднаних за загальним послідовно-логічним принципом роботи, і включає пристрій завантажувально-бункерний, похилий магазин-накопичувач заготовок, стандартний одно-кривошипний прес, штамп спеціальної конструкції,

пристрій досилання заготовок у штамп – пневмо-маніпулятор КМО.63 Ц 4212, пристрій видалення

виробів із штампта та автономний автоматизований комплекс управління технологічним процесом.

Таблиця 1 – Технічні дані та характеристики розробки

Число заготовок, що завантажуються одночасно у пустий бункер, шт.	600	Середня тривалість одного циклу, с	6
Маса партії завантаження, кг	24	Ємність похилого магазину-накопичувача, шт.	8
Діаметр заготовок, мм	60	Точність позиціонування, мм	$\pm 0,2$
Товщина заготовок, мм	1,5	Кут повороту штанги пристрою досилки, град.	45 – 240
Режими роботи:	а) «ручний»; б) «автоматичний»: – «одиначний», – «циклічний»	Напруга живлення, В	~220 / (-24)
Середня продуктивність комплексу в автоматичному режимі при повному завантаженні бункера заготовками, штампованих виробів за хвилину (шт. / хв.)	40	Тиск повітря у магістралі виконуючих механізмів, МПа (кгс / см ²)	0,45 (4,5)
		Габарити чаші для завантаження заготовок: діаметр, мм висота, мм	450 150

Взаємодія складових компонентів розробленого комплексу та поопераційна їх робота описуються нижче і для наочності пояснюються схемою завантажувально-бункерного вібраційного пристрою (рис. 1) і блок-схемою пристрою управління технологічним комплексом (рис. 2).

тажувально-бункерного вібраційного пристрою (рис. 1) і блок-схемою пристрою управління технологічним комплексом (рис. 2).

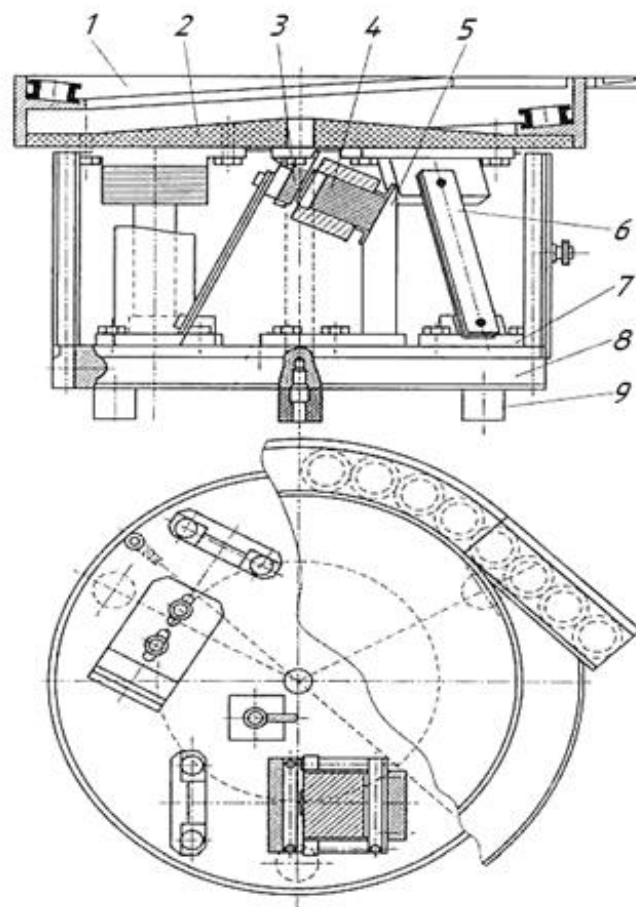


Рис. 1. Схема завантажувально-бункерного вібраційного пристрою:

- 1 – чаша для завантаження заготовок; 2 – дно конусне з текстоліту; 3 – якір; 4 – вібратор електромагнітний; 5 – стійка кріплення вібратора; 6 – підвіска (пружно-пружиняча опора) кріплення чаші бункерного накопичувача; 7 – кронштейн; 8 – підстава; 9 – амортизатор гумовий

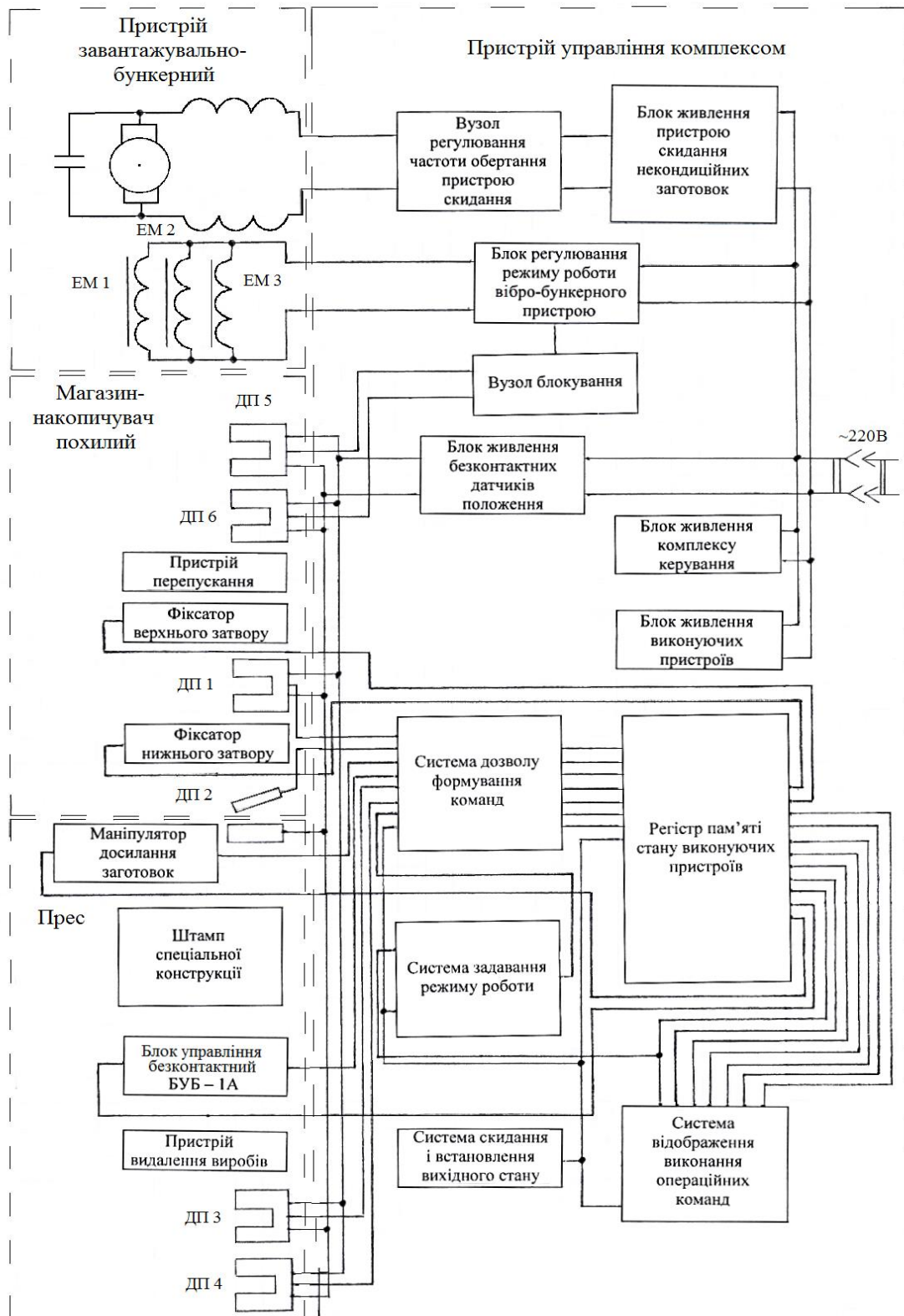


Рис. 2. Блок-схема пристрою управління роботизованим технологічним комплексом штампування

Диски-заготовки заданого діаметра та фіксованої товщини завантажуються «насіпом» у пристрій завантаження бункера (рис. 1). За допомогою електромагнітів (4) бункер приводиться в коливальний рух. Чаша (1) вібробункера з гвинтоподібною транспортною доріжкою встановлена на похилих пружно-пружинячих опорах (6). Завдяки такому кріпленню на заготовки передаються вертикальні та го-

ризонтально тангенціальні складові збурень. Під їх впливом здійснюється орієнтація (заготовки легають рівно), розшарування та коловий рух заготовок. Профіль дна накопичувача (2) має невеликий нахил від центру чаші до стінок та забезпечує зміщення заготовок під час їх руху до периферії бункера та на шляху до транспортної колії. Заготовки вишиковуються одна за одною та рухаються по спіралі лотка.

Для усунення руху заготовок внавал, їх сортування від деформованих і дисків з великими задирами на шляху їхнього прямування встановлюється активна вільна від заклинювання щілина. Вона утворюється гумовим валом скидувача, вісь якого розташовується під невеликим кутом (порядку 30°) по ходу руху до дотичного ділильного кола доріжки транспортування. Висота цієї щілини регулюється і встановлюється близько 1,5 товщини заготовки. Вал скидача обертається з великою швидкістю, захоплює заготовку, що підноситься, і скидає через внутрішню бічну стінку лотка всередину чаші накопичувача. Заготовка знову повторює пройдений шлях. Частота обертання валу двигуна скидача має два дискретні значення і задається з пульта управління.

Вихід заготовок з вібробункерного пристрою накопичувача має ймовірнісний, випадковий характер. Для узгодженої роботи накопичувального пристрою та преса комплекс обладнаний проміжним похилим магазином-накопичувачем.

У вихідному стані (рис. 2) нижній електромагнітний затвор перепускного вузла - "подача" похилого магазину-накопичувача закритий, верхній відкритий. Заготовки одна за одною надходять з вібробункерного пристрою і під дією складової сили ваги заповнюють магазин-накопичувач. При утворенні стопки з 8 заготовок за допомогою безконтактних датчиків положення ДП 5, ДП 6 та логічного пристрою блокування відключається привод вібробункерного пристрою, припиняється подача заготовок і усувається таким чином переповнення лотка похилого магазину-накопичувача. При видачі заготовки в штамп преса та зменшення стопи логічний пристрій включає електромагніти вібробункера та проводить докомплектування магазину. Процес повторюється. Заповнення похилого магазину-накопичувача заготовками відбувається незалежно від інших стадій, що протікають одночасно з роботою преса. Найкращий режим накопичення підбирається оптимальними умовами вібротранспортування заготовок у вібробункері – вибором амплітуди вібрації – шляхом регулювання напруги, що живить електромагніти ЕМ 1 – ЕМ 3 (при незмінних раніше підібраних жорсткості похилих пружинячих стійок (6) і ширині зазору якорю (3)), контроль якої здійснюється за вбудованим на пульті управління вольтметром.

У режимі "робота" за наявності заготовки у вихідному положенні в лотку магазину-накопичувача (датчик ДП 1 між електромагнітними затворами перепускного пристрою знаходиться в стані логічної "одиниці") і відсутності сигналів блокування по команді з пристрою управління включається перепускний пристрій (фіксатори нижнього електромагнітного затвора опускаються, верхнього-піднімаються), і заготовка зісковзує з лотка магазину-накопичувача на поверхню матриці і рухається по ній уповільнено. У момент зісковзування спрацьовує датчик ДП 2, який запускає формувач одиночних імпульсів з постійною тривалістю, достатньою для включення пристрою досилання заготовки в штамп. За схемним рішенням перепускний пристрій знаходиться у включеному стані з моменту подачі команди "пуск"

до моменту спрацювання датчика положення ДП 2. Весь цей час фіксатори верхнього електромагнітного затвора перепускного пристрою знаходяться в піднятому стані, утримують передостанню і вище розташовані заготовки від зісковзування і попадання у штамп.

Пристрій досилання, побудований на базі уніфікованого пневмоманіпулятора КМ 0.63 Ц4212, через клиноподібний засіб за допомогою штанги досилає заготовку до упору в отвір вузла матриці і забезпечує суміщення геометричного центру заготовки з робочою віссю штампа. Включення приводу пристрою досилання здійснюється електропневматичним клапаном за командою датчика положення ДП 2.

Переміщення штанги пристрою досилання регулюється місцем розташування упорів, за допомогою яких варіюється кут повороту валу пневмодвигуна. Швидкість повороту валу приводу у прямому і зворотному напрямку змінюється пневмодроселями Др 1, Др 2. Конструктивно в пристрої є колійний мікроперемикач, що спрацьовує від кулачкового механізму в кінці зворотного ходу приводу валу і сигналізує про завершення операції досилання заготовки у штамп. З приходом цієї команди схема запуску преса виробляє одиночний імпульс та за допомогою електронного блоку управління БУБ-1А включає прес. Відбувається штампування (перфорація) деталі.

БУБ-1А має досконалу систему контролю та здійснює операцію лише за справності всіх функціональних вузлів, систем преса, відсутності будь-якого сигналу блокування та знаходження в межах норми параметрів енергоносіїв. Тому за появою наявності імпульсу включення приводу преса можна робити висновок про факт виконання операції штампування. Цей принцип покладено в основу роботи схеми контролю завершення технологічної операції та дозволяє уникнути установки додаткових датчиків положення.

Схема контролю завершення штампування підключається паралельно електропневмо клапану приводу преса і по його задньому фронту робочого імпульсу формує сигнал команди на наступну операцію виштовхування, тобто в момент після завершення штампування (пробивки отворів). Причому, згідно з функціональними особливостями роботи преса, цей сигнал закінчується тоді, коли шатун преса піднімається у верхнє положення.

Для страхування електропневматичний клапан пристрою виштовхування виробу із штампу відкривається після невеликої затримки. Спрацьовує пневмоциліндр. Його шток виштовхує з блоку штампу проштампований (перфорований) диск і надає йому деякого поступального імпульсу. Диск потрапляє в похилий жолоб і під дією складової сили ваги зісковзує в бункер приймання готових деталей.

У процесі виштовхування жорстко пов'язаний зі штоком «прапорець» у крайньому правому положенні виштовхувача заходить у зазор магнітопроводу генераторного датчика ДП 3, за сигналом якого змінюється напрямок подачі повітря в пневмоциліндр. Шток повертається у вихідне положення. Воно ідентифікується сигналом логічної «одиниці» датчика положення вихідного стану виштовхувача ДП 4.

Цей сигнал одночасно є сигналом завершення циклу роботи технологічного комплексу.

З пульта пристрою управління передбачено включення роботи комплексу в «ручному» та «автоматичному» режимах. У «ручному» режимі є можливість почергового включення окремих вузлів – перепускного пристрою, пристрою досилання, преса, виштовхувача, а також виконання одного повного циклу комплексу в «одиночному» режимі при натисканні кнопки "Пуск". В «автоматичному» режимі сигнал датчика ДП 4 в кінці циклу є командою виконання наступного циклу комплексом. Таким чином, його робота цикл за циклом повторюється за описаним раніше алгоритмом. В електронному пристрої управління комплексом передбачено ряд блокувань, що забезпечує його надійне функціонування.

Кожна наступна операція може бути виконана тільки після завершення попередньої. З цією метою у пристрої управління передбачений регістр осередків пам'яті для зберігання інформації про стан відповідного вузла, які встановлюються у вихідне «нульове» положення перед початком кожного циклу роботи. Інформація про хід виконання операцій для візуального контролю виводиться на пульт управління за допомогою світлодіодної матриці. Вона наочна та необхідна як у режимі налаштування, так і в режимі експлуатації.

Запуск комплексу можна здійснити лише при знаходженні штока виштовхувача в крайньому лівому виведеному з матриці стані та за наявності заготовки у вихідному положенні в похилому магазині-накопичувача. У «ручному» режимі при натисканні одночасно двох і більше кнопок команди керування блокуються. Управління можна здійснювати тільки одним виконавчим пристроєм. Будь-якої миті, на будь-якій стадії роботи можна провезти зупинку комплексу – натисканням кнопки "Стоп".

За допомогою даної розробки можуть бути створені високопродуктивні надійні недорогі гнучкі технологічні системи штампування із штучним завантаженням заготовок та оснащені допоміжним обладнанням, яке принципово відмінне від промислових і відомих раніше аналогів. Такі технологічні

засоби можуть бути легко реалізовані і експлуатуватися як самостійно, так і в складі функціональних ліній. Є можливість модифікування розробленого варіанту залежно від вирішуваних функціональних завдань та зміни виду деталей, що виготовляються, при попередньому алгоритмі виконання операцій, шляхом внесення конструктивних змін у тракти вібротранспортування, вузли орієнтування, магазин-накопичувач чи їх заміни.

Для підвищення продуктивності роботи і надійності функціонування розробленого засобу створено спеціальні оснащення і електронні датчики положення, безконтактні схеми керування виконавчими пристроями і механізмами, спроектовані системи управління, діагностування, контролю, блокування.

Висновки

Розроблено накопичувальний комплекс для автоматизованого завантаження штучними дископодібними заготовками уніфікованих одно-кривошипних пресів у роботизованих процесах штампування. Запропоновано сучасні варіанти практичної реалізації поставленої задачі технічним, схемним і конструкторським модернізуванням і переоснащенням технологічного обладнання. Підвищення продуктивності і надійності роботи засобу, спрощення й здешевлення його побудови ґрунтоване на використанні і комплексному поєднанні можливостей впливу «активних», «пасивних», інформаційних параметрів функціональних вузлів на формування і корегування здійснюваних операційних виробничих потоків.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Павленко І. І., В. А. Мажара Роботизовані технологічні комплекси. Кіровоград: КНТУ, 2010. 392 с. URL: http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/avp/metod/%D0%A0%D0%A2%D0%9A_%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%9F%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%9C%D0%B0%D0%B6%D0%B0%D1%80%D0%B0.pdf
2. Плєснецов Ю. О. Ковальсько-штампувальне обладнання. Механічні преси / Ю.О.Плєснецов, В.О.Маковей – Х.: НТУ «ХП», 2014. – 236 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/44c08fc4-aacc-4c69-837f-56a40126068f>
3. Омаров М. А. Основи прикладної механіки / М. А. Омаров, В. І. Роменський, І. О. Яшков – Харків: ХНУРЕ, 2016. – 416 с. URL: <https://openarchive.nure.ua/bitstreams/59608c70-9701-4688-a688-df762677c8c4/download>
4. Kalafatova L. Modern materials and processing technologies as a factor in the development of the aerospace and rocket industries. Cutting and Tools in Technological Systems, No. 103 (2025), pp. 132-144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2025.103.10>
5. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні / Л. Є. Пелевін, К. І. Почка, О. М. Гаркавенко, Д. О. Міщук, І. В. Русан. – К.: ТОВ «НБП «Інтерсервіс»», 2016. – 258 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/381408750_SINTEZ_ROBOTOTEHNICNIH_SISTEM_V_MASINOBUDUVANNI
6. Бочков В.М., Сілін Р.І. Обладнання автоматизованого виробництва. – Львів: Видавництво ДУ «Львівська політехніка», 2000. – 380 с. URL: <https://librarygo.lpnu.ua/?elbook=obladnannya-avtomatyzovanogo-vyrobnyctva>
7. Карпенко, Т., Музика, І., & Шишкін, В. (2023). Про силовий розрахунок захватних механізмів і затискачів за допомогою «золотого» правила механіки. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, (46), 45–54. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288124>

8. Проць. Я. І. Захоплювальні пристрої промислових роботів / Я.І. Проць – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2008. – 232 с. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/783/1/Textbook-Prots_Ya-Gripping_devices_of_industrial_robots_2008.pdf
9. Дорохов М. Ю. Роботи та маніпулятори. / М. Ю. Дорохов. – Краматорськ: ДДМА, 2019. – 53 с. URL: http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/ptm/metod/rm/%D0%9C%D0%A3%20%D0%B4%D0%BE%20%D0%A1%D0%B0%D0%BC%20%D0%A0%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B8_%D0%A0%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B8%20%D1%82%D0%B0%20%D0%9C%D0%B0%D0%BD%D1%96%D0%BF.pdf
10. Драгобецький В.В. Вибір і розрахунок захватних пристроїв промислових роботів / В.В. Драгобецький, Д.В. Савелов, Р.А. Вакуленко. – Кременчук: НОВАБУК, 2024. – 120 с. URL: https://document.kdu.edu.ua/el_vid.php?spec=131

Received (Надійшла) 02.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

- Дрючко Олександр Григорович** – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, 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; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2157-0526>;
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6504199218>.
- Шефер Олександр Віталійович** – доктор технічних наук, професор, 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, Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Poltava, Ukraine;
 e-mail: 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>.
- Кислиця Світлана Григорівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;
Svitlana Kyslytsia – 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.skyslytsia@nupp.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2431-9900>;
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57671474500>.
- Захарченко Руслан Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, 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; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-4651-0159>;
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221734157>.
- Боряк Богдан Радиславович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, 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: boriakbr@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>.

Development and automation of technical equipment for robotic stamping complexes

Oleksandr Dryuchko, Oleksandr Shefer, Svitlana Kyslytsia, Ruslan Zakharchenko, Bohdan Boryak

Abstract. Relevance. The automation of stamping production processes remains an important task, especially for small and medium-sized parts with complex geometry and diverse physical and mechanical properties. Traditional mechanical means of loading and orienting workpieces are ineffective for such items. The development of flexible robotic systems allows for the reduction of manual labor, increased productivity, and improved reliability of the technological process. **Object of research:** the technical equipment of robotic stamping complexes, including storage devices, workpiece feeding manipulators, press installations, and automated control systems for technological operations. **Purpose of the article:** the development of a multi-purpose automated loading and storage system for individual feeding of disc-shaped workpieces, which integrates with universal single-crank presses and ensures enhanced productivity and reliability of the stamping process. **Research results:** an autonomous storage complex has been developed, consisting of a hopper, an inclined magazine, a pneumatic manipulator for feeding workpieces into the die, and a product removal device. Manual and automatic operation modes have been implemented, ensuring the blocking of deformed workpieces and items with burrs, monitoring the completion of the technological cycle, and synchronizing with the press. The combined use of active, passive, and informational elements of the system's units increases productivity, reliability, and simplifies the design. **Conclusions:** an efficient automated complex for feeding disc-shaped workpieces into robotic stamping systems has been created. The system allows for modernization of existing equipment without significant costs, increases productivity and reliability of the technological process. Its practical implementation includes the modification of units for different types of workpieces and operations, as well as the use of electronic sensors and control systems to ensure monitoring and blocking.

Keywords: special equipment, accumulation complex, artificial loading of blanks, robotic stamping processes, automation, innovations.

А. І. Криворот, Є. А. Васильєв, О. С. Васильєв, Г. Ф. Дураченко

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

ВПЛИВ ВИДУ МОТОРНОГО ПАЛИВА ТА ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ РУХУ НА КОЕФІЦІЄНТ НАВАНТАЖЕННЯ ДВИГУНА АВТОМОБІЛЯ КАТЕГОРІЇ M1

Анотація. **Актуальність.** Сучасний розвиток автомобільного транспорту характеризується масовим переходом на альтернативні види палива, зокрема зріджений нафтовий газ (LPG), через його економічність та екологічність. Проте більшість існуючих досліджень зосереджені на загальних показниках паливної економічності, тоді як вплив виду палива на коефіцієнт навантаження двигуна (k_H) в умовах реальної експлуатації та при різних швидкісних режимах залишається недостатньо вивченим. Розуміння цих процесів є критично важливим для оптимізації роботи двигуна та підвищення його ресурсу. **Об'єкт дослідження.** Легковий автомобіль категорії M1 (Mitsubishi Lancer IX з двигуном 4G18), оснащений системою газобалонного обладнання (ГБО) четвертого покоління STAG 200 Go-Fast. **Мета статті.** Експериментальне дослідження та кількісна оцінка впливу виду моторного палива (бензин А-95 та LPG) і швидкості усталеного руху на коефіцієнт навантаження двигуна внутрішнього згоряння в реальних дорожніх умовах. **Результати дослідження.** В ході експериментів на швидкостях 40, 60 та 80 км/год було встановлено, що використання LPG призводить до підвищення коефіцієнта навантаження двигуна на 11–13% порівняно з бензином А-95. Це пояснюється необхідністю компенсації зниження ефективної потужності (на 3–10%) через нижчу об'ємну енергоємність газоповітряної суміші. За допомогою математико-статистичного аналізу побудовано регресійну модель, яка описує залежність навантаження від швидкості та виду палива. Визначено, що зона мінімального відсоткового навантаження для обох видів палива знаходиться в межах швидкостей 55–60 км/год. **Висновки.** Доведено, що робота двигуна на газовому паливі супроводжується вищим рівнем відносного навантаження, що підвищує термічну та механічну напруженість його деталей. Для оптимізації експлуатації автомобілів з ГБО рекомендовано підтримувати швидкісний режим у зоні 55–60 км/год на четвертій передачі, що забезпечує найвищу ефективність роботи силової установки. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення алгоритмів роботи електронних блоків керування ГБО.

Ключові слова: коефіцієнт навантаження ДВЗ, LPG, бензин, усталений рух, газобалонне обладнання, експлуатаційні показники, Mitsubishi Lancer IX.

Вступ

Сучасний розвиток автомобільного транспорту характеризується зростанням вимог до паливної економічності та екологічних показників [1]. Автомобілі категорії M1, що становлять найбільшу частку парку легкових транспортних засобів, переважно експлуатуються в режимах часткових навантажень двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), особливо в умовах міського руху [2, 3]. Використання газових моторних палив (LPG та CNG) набуло широкого поширення завдяки їх економічним перевагам та меншому негативному впливу на навколишнє середовище [1]. Зокрема, в Україні частка легкових автомобілів, переобладнаних для роботи на зрідженому нафтовому газі (LPG), оцінюється як одна з найвищих у Європі [4].

Встановлення газобалонного обладнання (ГБО) четвертого покоління, що забезпечує послідовне фазоване впорскування газу, змінює умови роботи ДВЗ, що може впливати на його навантажувальні характеристики. Для кількісної оцінки ступеня використання ефективної потужності ДВЗ застосовується коефіцієнт навантаження двигуна k_H , який є узагальнюючою характеристикою роботи силової установки [1, 2, 5]. Актуальність роботи обумовлена необхідністю комплексного дослідження впливу виду палива та швидкісних режимів руху на цей ключовий експлуатаційний показник в умовах реальної експлуатації, оскільки такі дослідження в існуючій літературі обмежені [5].

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку автомобільного транспорту характеризується

стійкою тенденцією до посилення вимог щодо паливної економічності та екологічної безпеки транспортних засобів. Особливої актуальності ці питання набувають в умовах міської експлуатації, де зосереджена найбільша кількість легкових автомобілів категорії M1 [1, 6]. Аналіз режимів роботи двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) таких автомобілів свідчить, що більшу частину часу вони функціонують в умовах часткових навантажень, які суттєво відрізняються від номінальних параметрів, закладених при їх проектуванні [1, 2].

Одним із ключових інтегральних показників, що характеризує ефективність використання енергетичного потенціалу силової установки в реальних умовах руху, є коефіцієнт навантаження ДВЗ. Його значення визначається сукупним впливом багатьох чинників: конструктивними параметрами транспортного засобу, дорожніми умовами, швидкісним режимом та, що вкрай важливо, фізико-хімічними властивостями використовуваного палива [1, 5]. Зміна характеристик палива безпосередньо впливає на процеси сумішоутворення, швидкість згоряння паливно-повітряної суміші та, як наслідок, на навантажувальні характеристики двигуна [7].

В останні десятиліття, з огляду на економічну доцільність та екологічні чинники, широкого поширення набули газові моторні палива, зокрема зріджений нафтовий газ (LPG) та стиснений природний газ (CNG) [8]. В Україні частка легкових автомобілів категорії M1, переобладнаних для роботи на LPG, за різними оцінками становить від 25 до 35 %, що є одним із найвищих показників у Європі [8]. Використання

газу дозволяє знизити викиди оксиду вуглецю, вуглеводнів та твердих частинок, що є критично важливим для міського середовища [4].

Проте перехід з бензину на газове паливо змінює умови протікання робочих процесів у циліндрах. Газоподібне паливо має вище октанове число, що дозволяє уникнути детонації, але водночас воно витісняє частину повітря з впускного колектора, що може призводити до зниження ефективної потужності на 3–10 % [5]. Для мінімізації цих негативних ефектів сучасні автомобілі оснащуються системами газобалонного обладнання (ГБО) четвертого покоління, які забезпечують послідовне фазоване впрскування газу, максимально наближене до алгоритмів роботи штатних бензинових систем.

Незважаючи на значну кількість наукових праць, присвячених оцінці паливної економічності та токсичності відпрацьованих газів при роботі на альтернативних паливах, питання впливу виду палива на відсоткове навантаження двигуна в режимах усталеного руху залишається висвітленим недостатньо [5, 6]. Більшість існуючих методик зосереджена на загальних показниках експлуатації, тоді як кількісна оцінка зміни навантажувальних режимів при переході між бензином та газом на різних швидкостях потребує додаткових експериментальних досліджень.

Актуальність даної проблеми обумовлена необхідністю глибокого розуміння того, як саме змінюється ступінь використання потужності двигуна при сталому русі автомобіля. Це дозволить не тільки оптимізувати налаштування систем паливоподачі, а й надати практичні рекомендації водіям щодо вибору найбільш раціональних швидкісних режимів з точки зору ресурсозбереження та довговічності силової установки. Використання сучасних методів системного аналізу та комп'ютерних технологій статистичної обробки даних дозволяє об'єктивно оцінити ці зміни та виявити закономірності формування навантажувальних режимів ДВЗ [1–3].

Метою роботи є експериментальне дослідження впливу виду палива (бензин А-95 та LPG) та швидкості усталеного руху автомобіля категорії М1 на коефіцієнт навантаження двигуна внутрішнього згоряння.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати теоретичні передумови формування коефіцієнта навантаження ДВЗ.
2. Обґрунтувати вибір об'єкта дослідження (Mitsubishi Lancer IX) та засобів контролю параметрів (STAG 200 Easy, ELM 327).
3. Розробити та реалізувати план експерименту для визначення відсоткового навантаження ДВЗ в режимах усталеного руху на бензині та LPG.
4. Побудувати та перевірити адекватність математичної моделі залежності відсоткового навантаження ДВЗ від досліджуваних факторів.
5. Сформулювати практичні рекомендації щодо оптимізації експлуатаційних режимів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективність роботи ДВЗ в експлуатаційних умовах визначається комплексом взаємопов'язаних факторів,

серед яких ключове місце займають режими руху транспортного засобу, технічний стан та вид використовуваного моторного палива [1, 2, 5].

Теоретичні основи коефіцієнта навантаження ДВЗ. Коефіцієнт навантаження двигуна k_H визначається співвідношенням ефективної потужності N_e до номінальної потужності $N_{ном}$ при заданій частоті обертання [1]:

$$k_H = \frac{N_e}{N_{ном}}. \quad (1)$$

Коефіцієнт навантаження k_H є важливим експлуатаційним показником, що відображає ступінь використання потужності [1]. У міських умовах для автомобілів категорії М1, k_H зазвичай становить 0,2–0,5, що вказує на роботу в режимах часткових навантажень. Зі збільшенням k_H покращується паливна економічність, тоді як низькі значення супроводжуються підвищеними відносними втратами [1].

Вплив швидкісних режимів усталеного руху. При усталеному русі навантаження на ДВЗ формується необхідною потужністю для подолання сумарної сили опору руху, яка для рівної дороги дорівнює сумі сил опору коченню F_k та аеродинамічного опору F_a , [1]. Сила аеродинамічного опору зростає пропорційно густині повітря ρ , коефіцієнту аеродинамічного опору C_x , лобовій площі автомобіля A та квадрату швидкості руху автомобіля v , [1]:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot A \cdot v^2. \quad (2)$$

Різке зростання F_a призводить до зростання k_H на високих швидкостях [1]. Водночас, на низьких швидкостях паливна економічність погіршується через роботу в зоні підвищених відносних механічних та насосних втрат [2]. Для кожного двигуна існує оптимальний діапазон частот обертання та навантаження, що забезпечує мінімальну питому витрату палива [5].

Вплив виду моторного палива. Фізико-хімічні властивості LPG (газоподібна форма, нижча енергетична густина) призводять до зниження об'ємної ефективності та зменшення максимальної ефективної потужності ДВЗ на 3-10% порівняно з бензином [1, 5]. Ефективна потужність пов'язана з ефективним крутним моментом двигуна M_e та кутовою швидкістю обертання колінчастого вала ω :

$$N_e = \frac{M_e \cdot \omega}{1000}. \quad (3)$$

Зниження N_e (LPG) при незмінній потужності, необхідній для руху автомобіля, призводить до зростання k_H [1]. Дослідження підтверджують, що питомо витрата палива на LPG може бути вищою [4]. Сучасне ГБО 4-го покоління, використовуючи сигнали бензинових форсунок, мінімізує вплив зміни палива на навантажувальні режими, проте не усуває його повністю [3, 5].

Таким чином, існує проблема кількісної оцінки та порівняльного аналізу зміни коефіцієнта навантаження ДВЗ автомобіля категорії М1 при переході з бензину на LPG та в умовах різних швидкісних режимів усталеного руху.

Основний матеріал

Об'єктом дослідження обрано легковий автомобіль Mitsubishi Lancer IX (2006 р.в.) з бензиновим двигуном 4G18 (1.6 л, 72 кВт) [9]. Основні технічні характеристики автомобіля наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики Mitsubishi Lancer IX [9]

Характеристика	Показник
Клас автомобіля	С
ДВЗ:	4G18
Надув	Ні
Розташування ДВЗ	Поперечно з переду
Розташування циліндрів	L4
Клапанів на циліндр	4
Розташування клапанів та розподільчого валу	Верхньоклапанний з верхнім розташуванням розподільчого валу
Система подачі палива	Інжектор, розподільне впорскування палива
Трансмісія: Механічна 5-ти ступенева коробка передач F5M41-1-R7B5	1-а – 3,583 2-а – 1,947 3-я – 1,343 4-а – 0,976 5-а – 0,804 3.х. – 3,416 Г.п. – 4,333
Тип приводу	Передній
Експлуатаційні показники:	
Максимальна швидкість, км / год.	183
Розгін до 100 км / год., сек	11,8
Паливовитрати л на 100 км. (міськ.ц)	8,8
Паливовитрати л на 100 км. (зам. ц.)	5,5
Об'єм паливного баку, л	50
Паливовитрати л на 100 км. (зміш.ц)	6,7
Повна маса, кг	1750

Двигун 4G18 оснащений ГБО четвертого покоління STAG 200 Go-Fast.

Для реєстрації та контролю параметрів використовувались:

– програмне забезпечення STAG 200 Easy для зчитування параметрів роботи ГБО, включаючи параметр "Engine load" $K_{ДВЗ}$, %);

– bluetooth-діагностичний сканер ELM 327 [10] для дублювання та верифікації параметрів через OBD-II інтерфейс;

безконтактний інфрачервоний пірометр GM300H для контролю температурних режимів.

Експерименти проводились на горизонтальній ділянці траси Е-40 (М-03) після повної стабілізації теплових режимів [1, 2].

Перед заїздами контролювалась відсутність сторонніх опорів (шлях вибігу при 60 км/год становив 741,66 м), [1, 2], що підтверджувало справність гальмівної системи.

План експерименту: двофакторний тривірневий план [11].

Фактор Х1.

Вид палива (I).

Рівні: LPG (I=4, код -1),

Змішаний (I=6, код 0),

Бензин А-95 (I=8, код +1).

Фактор Х2.

Швидкість усталеного руху (V, км/год).

Рівні: 40 км/год (код -1),

60 км/год (код 0),

80 км/год (код +1).

Вимірювання відсоткового навантаження ДВЗ ($K_{ДВЗ}$) проводилось на четвертій передачі (передавальне число 0,976) [9], з тривалістю кожного режиму 1 хвилина.

Отримані експериментальні дані (табл. 2) були систематизовані та оброблені методами математико-статистичного аналізу [11, 12]. На основі цих даних було розраховано коефіцієнти регресійного рівняння другого порядку.

Таблиця 2 – Обробка експериментальних даних при роботі ДВЗ досліджуваного автомобіля Mitsubishi Lancer 9 на бензині А-95 PRO

№ до- сліду	Матриця планування (x_i)		Квадрати змінних (x_i^2)		Взаємодія (x_1x_2)	Відсоткове навантаження ДВЗ					
	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2		x_1x_2	y	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2
1	+	+	+	+	+	46	46	46	46	46	46
2	+	-	+	+	-	41	41	-41	41	41	-41
3	-	+	+	+	-	58	-58	58	58	58	-58
4	-	-	+	+	+	52	-52	-52	52	52	52
5	+	0	+	0	0	49	49	0	49	0	0
6	-	0	+	0	0	61	-61	0	61	0	0
7	0	+	0	+	0	49	0	49	0	49	0
8	0	-	0	+	0	58	0	-58	0	58	0
9	0	0	0	0	0	46	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	42	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	43	0	0	0	0	0
					Σ	545	-35	2	307	304	-1

Параметричне рівняння регресії. Після переведення з кодового вигляду отримано таке параметричне рівняння:

$$K_{\text{ДВЗ}} = 0,77655 \cdot I^2 - 0,00625 \cdot I \cdot V - 11,86085 \cdot I + 0,0040155 \cdot V^2 - 0,42769 \cdot V + 103,632. \quad (4)$$

де I – умовний код паливного фактора; V – швидкість, км/год.

Статистична перевірка адекватності рівняння за критерієм Фішера показала, що виконується така нерівність

$$F_{\text{розм.}} = 4,6164 < F_{\text{табл.}} = 19,2, \quad (5)$$

підтверджуючи коректність моделі.

Зміна $K_{\text{ДВЗ}}$ від швидкості (V) та виду палива (I):

На основі параметричного рівняння регресії (4) побудовані графічні залежності $K_{\text{ДВЗ}}(V)$ для всіх паливних режимів (рис. 1).

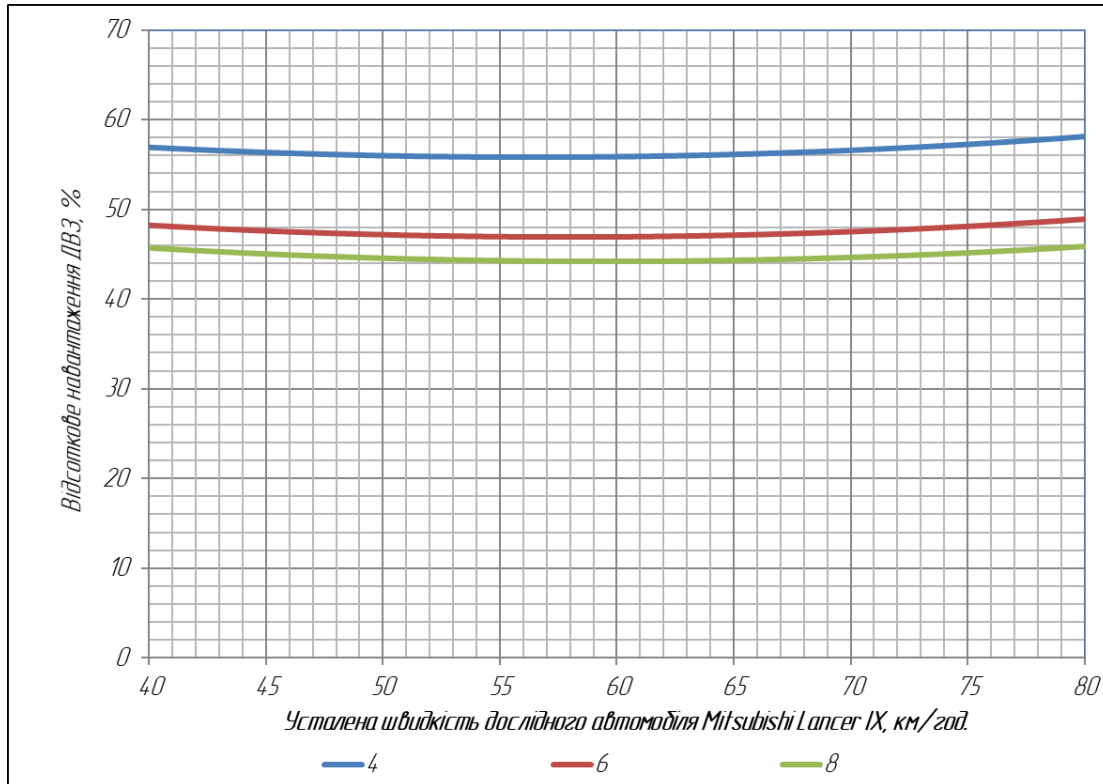


Рис 1. Графічна залежність відсоткового навантаження ДВЗ автомобіля Mitsubishi Lancer IX при роботі двигуна на постійній кількості використовуваних інжекторів при поступовому зростанні усталеної швидкості руху досліджуваного транспортного засобу

Зона мінімального навантаження: Спостерігається U-подібна залежність з мінімумом у зоні 55-60 км/год незалежно від виду палива (LPG \approx 56%, бензин \approx 44 %).

Вплив палива: $K_{\text{ДВЗ}}$ при роботі на LPG є вищим на 11-13 відсоткових пунктів порівняно з бензином. Зазначимо, що мішаний режим займає проміжне положення.

Зміна $K_{\text{ДВЗ}}$ від фактора палива (I) на постійній швидкості (V): залежність $K_{\text{ДВЗ}}(I)$ (рис. 2) демонструє монотонне зниження навантаження при переході від LPG ($I = 4$) до бензину ($I = 8$).

Підтвердження оптимального режиму. Виявлення зони мінімального відносного навантаження (55-60 км/год) підтверджує теоретичні викладки [1, 2, 5, 7], щодо існування оптимального швидкісного режиму, де ефективність ДВЗ є найвищою.

Це має пряме практичне значення для розробки рекомендацій щодо екологічного та економічного водіння, [6].

Пояснення зростання $K_{\text{ДВЗ}}$ на LPG. Збільшення $K_{\text{ДВЗ}}$ на LPG на 11-13% порівняно з бензином є кількісним вираженням необхідності компенсації зниження ефективної потужності ДВЗ (3-10%), спричиненого нижчою об'ємною ефективністю газоповітряної суміші.

Збільшення $K_{\text{ДВЗ}}$ на 11-13% є прямим індикатором того, що двигун працює з більшим відносним напруженням у газовому режимі для виконання тієї ж роботи.

Це підтверджує необхідність ретельного контролю параметрів ГБО та вказує на потенційне зростання термічної та механічної напруженості елементів двигуна [5, 7].

Значення математичної моделі. Побудована регресійна модель (4) дозволяє з високою точністю прогнозувати $K_{\text{ДВЗ}}$ для різних комбінацій швидкості та палива, забезпечуючи інструмент для об'єктивного оцінювання ефективності роботи ГБО, та необхідності коригування його налаштувань.

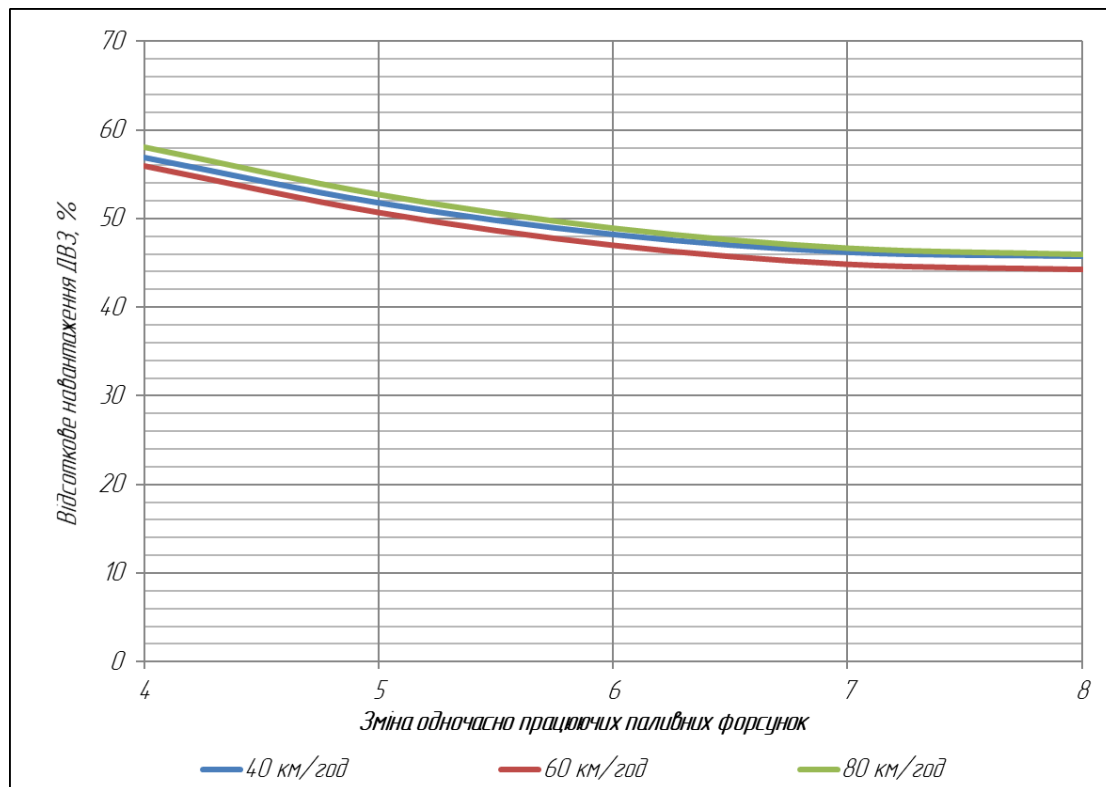


Рис. 2. Графічна залежність відсоткового навантаження ДВЗ автомобіля Mitsubishi Lancer IX при постійній усталеній швидкості досліджуваного транспортного засобу при різній кількості використовуваних інжекторів

Висновки

1. Проведено комплексне експериментальне дослідження впливу виду моторного палива (бензин А-95, LPG, змішаний) та усталеної швидкості руху (40, 60, 80 км/год) на відсоткове навантаження ДВЗ автомобіля Mitsubishi Lancer IX.

2. На основі математико-статистичної обробки даних, побудовано адекватну регресійну модель, що описує залежність відсоткового навантаження ДВЗ від досліджуваних факторів.

3. Встановлено, що зона мінімального відсоткового навантаження двигуна при усталеному русі

знаходиться в межах 55-60 км/год незалежно від виду палива, що є оптимальним експлуатаційним режимом.

4. Виявлено, що при роботі двигуна на LPG відсоткове навантаження є вищим порівняно з бензином А-95 (на 11-13%), що пояснюється необхідністю компенсації зниження ефективної потужності та особливостями алгоритмів ЕБУ.

5. Сформульовано практичні рекомендації, які включають підтримку швидкості в оптимальній зоні (55-60 км/год) при усталеному русі, використання 4-ї передачі як еталонного режиму, а також регулярний контроль тиску газу та теплових режимів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Експлуатаційні властивості автомобілів : навчальний посібник. В 2 ч. Ч 1. Динамічність та паливна економічність автотранспортних засобів / [В.П. Сахно, І.С. Мурований, В.М. Поляков та ін.]. – Луцьк : Вид-во Вежа ДРУК, 2025. – 307 с. URL: https://drive.google.com/file/d/1vOoFPaQM_OAdcafkQX7gVwbgDh5KapLJ/view
2. Шуклінов С. М., Альокса М. М. Автомобіль. Теорія та експлуатаційні властивості : навч. посіб. / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харків : ФОП Бровін О. В., 2022. 280 с. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/bitstreams/47fdddca-8610-47cf-9c27-7de352e04849/download>
3. Gutarevych, Y. et al.(2023). Improving the Energy Efficiency of a Vehicle by Implementing an Integrated System for Utilizing the Thermal Energy of the Exhaust Gases of an Internal Combustion Engine. In: Prentkovskis, O., Yatskiv (Jackiva), I., Skačkauskas, P., Maruschak, P., Karpenko, M. (eds) TRANSBALTICA XIII: Transportation Science and Technology. TRANSBALTICA 2022. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25863-3_14
4. Beddows D. C. S., Harrison R. M. PM10 and PM2.5 emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: Dependence upon vehicle mass and speed. Environmental Pollution. 2021. Vol. 270. P. 115623. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115623.
5. Heywood J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill, 1988. 930 p. URL: <https://dl.icdst.org/pdfs/files3/99e7aaa5c9b3ad06088da291045abca2.pdf>.
6. Хрутьба В. О. Характеристика екологічних небезпек міських транспортних систем / В. О. Хрутьба, О. В. Спасіченко, К. Г. Сарнавська // Збірник наук. праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія : Транспортні системи і технології. - 2019. - Вип. 33(2). - С. 156-166. - URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpdetut_tsit_2019_33\(2\)_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpdetut_tsit_2019_33(2)_17)

7. Stone R. Introduction to Internal Combustion Engines. 4th ed. SAE Int., 2012. 824 p. DOI <https://doi.org/10.1007/978-1-137-02829-7>
8. Abdullah, N. N. and Govand, A. 2021. An Empirical Analysis of Natural Gas as an Alternative Fuel for Internal Transportation. International Journal of English Literature and Social Sciences, 6(1), pp. 479- 485 DOI: <https://dx.doi.org/10.22161/ijels.61.64>
9. Mitsubishi Lancer : техн. характеристики [Електронний ресурс] // RikAuto : [сайт]. URL: <https://rikauto.com.ua>
10. Al-Tae M. A., Al-Saffar N. M., Abd El-Atty S. M. Android-based remote diagnostic system for automobiles. 2017 10th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). Hangzhou, China, 2017. Vol. 2. P. 463–468. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISCID.2017.151>
11. Експериментальні методи досліджень : навч. посіб. / О.Ю. Крот, Б.О. Коробко, О.П. Крот, В.В. Вірченко. – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2023. – 192 с.; іл. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/14572>
12. Системний підхід, методи досліджень процесів прокатування з аналізом поздовжньої сталості : навчальний посібник / О.П. Максименко, О.В. Нікулін, В.М. Самохвал та ін. — Кам'янське : ДДТУ, 2021. — 347 с. URL: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/5/23/5-26-b6.pdf>.

Received (Надійшла) 15.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Криворот Анатолій Ігорович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;
Anatoliï Kryvorot – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Mechatronics, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine;
 e-mail: anatoliikryvorot@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-5919-7352>;
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57217279936>.

Васильєв Євген Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;
Yevhen Vasyliiev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Mechatronics, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine;
 e-mail: vasylev.ea@nupp.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-5133-3989>;
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57193455660>.

Васильєв Олексій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;
Oleksii Vasyliiev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Mechatronics, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine;
 e-mail: a.s.vasiliiev.76@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-9914-5482>;
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57215918175>.

Дураченко Георгій Федорович – старший викладач кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;
Heorhii Durachenko – Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering and Mechatronics, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine;
 e-mail: heorhii@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-1378-7602>;
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57204842914>.

The influence of the type of motor fuel and speed modes of motion on the engine load coefficient of a category M1 vehicle

Anatoliï Kryvorot, Yevhen Vasyliiev, Oleksii Vasyliiev, Heorhii Durachenko

Abstract. Relevance. The current development of motor transport is characterised by a massive transition to alternative fuels, in particular liquefied petroleum gas (LPG), due to its cost-effectiveness and environmental friendliness. However, most existing studies focus on general fuel-efficiency indicators. At the same time, the impact of fuel type on the engine load coefficient (k_H) under real operating conditions and at different speeds remains insufficiently studied. Understanding these processes is critical for optimising engine performance and increasing its service life. **Object of research:** a category M1 passenger car (Mitsubishi Lancer IX with a 4G18 engine) equipped with a fourth-generation STAG 200 Go-Fast gas cylinder equipment (LPG) system. **Purpose of the article.** Experimental study and quantitative assessment of the impact of the type of motor fuel (A-95 petrol and LPG) and steady-state speed on the load coefficient of an internal combustion engine in real road conditions. **Research results.** During experiments at speeds of 40, 60, and 80 km/h, it was found that using LPG increased the engine load coefficient by 11-13% compared to A-95 petrol. This is explained by the need to compensate for the reduction in adequate power (by 3-10%) due to the lower volumetric energy density of the gas-air mixture. Using mathematical and statistical analysis, a regression model was constructed to describe the dependence of load on speed and fuel type. It has been determined that the zone of minimum percentage load for both fuel types is between 55 and 60 km/h. **Conclusions.** It has been shown that operating an engine on gasoline results in a higher relative load, which increases thermal and mechanical stresses on its parts. To optimise the operation of vehicles with LPG systems, it is recommended to maintain a speed of 55-60 km/h in fourth gear, which maximises the power unit's efficiency. The study's results can be used to improve the algorithms of electronic control units for LPG systems.

Keywords: internal combustion engine load factor, LPG, petrol, steady motion, gas cylinder equipment, operating performance, Mitsubishi Lancer IX.

В. І. Носков, С. Ю. Гавриленко, В. В. Скороделов, М. В. Гейко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ З ВИКОРИСТАННЯМ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ПОЇЗДУ

Анотація. **Актуальність.** Залізничний транспорт є одним з головних видів транспорту України. Підвищення ефективності його функціонування є головним завданням при його експлуатації. **Об'єкт дослідження:** процеси керування дизель-поїздом в процесі руху. **Мета статті:** розробити метод оцінки якості експлуатації тягового рухомого складу (ТРС) з автономним джерелом живлення шляхом використання траєкторії руху поїзда (ТРП). Для цього виконати розробку математичної моделі визначення тягового зусилля і провести розрахунок енерговитрат у процесі руху з урахуванням особливостей побудови схеми електропередачі. **Результати дослідження.** У статті проведено аналіз існуючих засобів оцінки ефективності експлуатації ТРС з автономним джерелом живлення, розроблено і обґрунтовано метод визначення цієї оцінки з використанням ТРП. Розроблено математичну модель і наведено приклад розрахунку витрат палива для випадку реальної траєкторії руху дизель-поїзда ДЕЛ-02 з параметрами, які були отримані завдяки наявності інформаційної системи в складі системи керування. **Висновки.** Розроблено і обґрунтовано метод визначення енерговитрат поїздів при їх експлуатації за допомогою ТРП, створено математичну модель, яка виконана за основним рівнянням руху поїзда.

Ключові слова: енерговитрати, математична модель, траєкторія руху поїзда, тяговий рухомий склад.

Вступ

Постановка проблеми. В умовах постійного підвищення цін на паливно-енергетичні ресурси розробка нових методів збереження електроенергії та пального є актуальним питанням у діяльності кожного залізничного підрозділу [1, 2]. Наявність у системах керування та контролю тягового рухомого складу (ТРС) засобів обчислювальної техніки з відповідним програмним забезпеченням дозволяє вирішити це завдання. Одним із варіантів оцінки енерговитрат є використання траєкторії руху поїзда (ТРП). Для цього розроблено математичну модель визначення тяги з подальшим обчисленням та аналізом енерговитрат руху поїзда по перегону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед методологій розрахунку витрат палива можна виділити три основні підходи. При традиційному підході принцип розрахунку полягає у визначенні базової норми витрат енергоресурсів, що розраховується для «типової моделі поїзда», параметри якої стандартизовані. Для врахування відхилень реальних умов експлуатації від «типової моделі», базова норма коригується за допомогою системи емпіричних коригувальних коефіцієнтів. Цей метод має обмеження, пов'язані з тим, що жодна модель, заснована на обмеженій кількості незалежних змінних, якими є коригувальні коефіцієнти, не може бути абсолютно точною.

Другий підхід полягає у використанні детальних тягових розрахунків для імітації руху поїзда по заданій ділянці шляху з урахуванням тягових характеристик локомотива і сил опору руху. Перевага такого підходу полягає в тому, що він дозволяє відмовитися від натурних поїздок, замість яких дослідники можуть виконувати багаторазові обчислювальні експерименти. Цей підхід дозволяє з високим ступенем точності розрахувати витрати палива та інші показники, але цей метод розраховує енерговитрати для вже заданого режиму ведення, а не шукає найкращий.

Третій підхід фокусується на пошуку енергозощаджуючих траєкторій. Методологія передбачає розрахунок багатоваріантних траєкторій із варіативними вихідними даними (маса поїзда, профіль шляху та ін.), а кінцевим результатом є побудова багатопараметричної функції управління потужністю локомотива, яка дозволяє зменшити витрати енергоресурсів.

У роботі [3] показано, що для оптимізації керування рухом локомотива за мінімумом енерговитрат треба виконувати розрахунки виходячи з умов виконання поїздки по ділянці шляху за заданий час при обов'язковому дотриманні обмежень на величину швидкості руху. У роботах [4, 5] наведено перелік основних параметрів, які треба враховувати при виборі енергозощаджуючих траєкторій. У роботі [6] для зменшення енерговитрат показано, що треба керувати потужністю локомотивів шляхом створення бортових апаратно-програмних комплексів, які мають у своїй структурі системи керування. У роботі [7] показано, що використання для тягових задач математичного апарату теорії варіаційного числення дає можливість визначити оптимальні способи керування з меншими енерговитратами. У роботі [8] розроблено модель для визначення споживання енергії на основі даних про швидкість поїзда, ухил колії, довжину ділянки, час подорожі та масу поїзда. Метою роботи [9] є розробка методу зменшення споживання енергії поїздом під час його руху, при якому враховуються динамічні характеристики (сила тяги, аеродинамічні впливи та ін.). Задача оптимізації вирішується за допомогою еволюційного алгоритму. Дизель-поїзди серії ДЕЛ-02 обладнані мікропроцесорною системою керування, яка забезпечує оптимальну роботу тягової електропередачі. У структуру схеми керування входить інформаційна система (ІС), яка керує контролем роботи блоків електропередачі здійснює запис її основних параметрів у реальному часі.

Метою роботи є розробка методу визначення енерговитрат ТРС з використанням ТРП, який дозволить виконувати оцінку ефективності кожної поїздки дизель-поїзда по параметрах, які реєструє ІС.

Основний матеріал

Для визначення витрат енергії (палива) поїздом під час проходження ділянки колії та подальшого аналізу цих витрат з оцінкою якості експлуатації, використовується його траєкторія руху. На рис. 1 наведено спрощену структурну схему системи електропередачі моторного вагона дизель-поїзда.

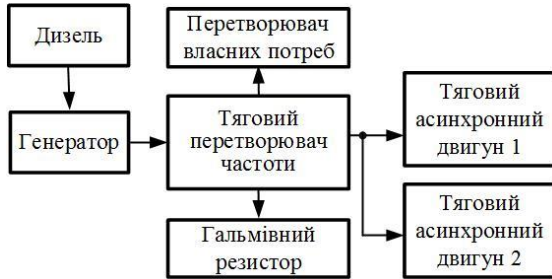


Рис. 1. Спрощена структурна схема системи електропередачі моторного вагона

На рис. 2 наведено траєкторію руху дизель-поїзда ДЕЛ-02, виконану у вигляді залежності швидкості від часу $V = f(t)$. Ці дані взяті з ІС, яка входить до складу системи керування дизель-поїздом ДЕЛ-02. Як видно з рис. 2, у ТРП можна виділити три характерні відрізки, яким відповідають такі режими руху поїзда: I (OAB) – розгін; II (BC) – рух із постійною швидкістю; III (CD) – гальмування; точка D відповідає станції призначення ділянки руху.

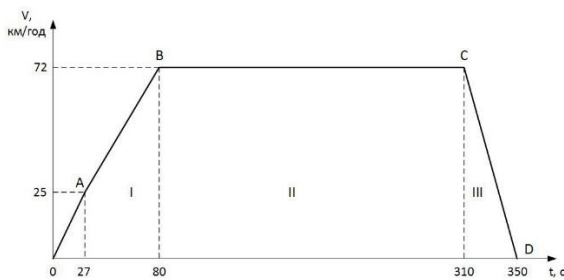


Рис. 2. Траєкторія руху дизель-поїзда

Розрахунок енерговитрат виконується за допомогою основного рівняння руху поїзда, який розглядається як тверде тіло з відомою масою, на яке діють сили тяги та опору руху:

$$F = G \cdot (102 \cdot (1 + \gamma) \cdot a + W_o \pm W_\delta), \quad (1)$$

де F – тягове зусилля; G – маса поїзда; $(1 + \gamma)$ – коефіцієнт інерції обертових мас ($\gamma = 0,1$); a – прискорення; W_o – основний опір руху поїзда; W_δ – додатковий опір руху поїзда, який залежить від профілю колії (підйом або спуск) [10].

Формулу для обчислення основного опору руху поїзда W_o з урахуванням опору повітряного середовища, внутрішнього тертя в рухомому складі, опору від впливу рухомого складу на шлях можна записати таким чином:

$$W_o = 1,1 + 0,012 \cdot V + 0,00025 \cdot V^2, \quad (2)$$

де V – швидкість поїзда.

Необхідні значення змінних для чисельного розв'язання рівняння руху поїзда беруться з бази даних (маса поїзда, профіль колії) та ТРП, а у зв'язку з тим, що вони не можуть змінювати свої значення швидко, для розрахунків з високою мірою точності можна використовувати метод Ейлера. Кожне значення тягового зусилля в даному випадку розраховується окремо залежно від знаку параметра прискорення:

при $a > 0$ (для відрізка I на рис. 2):

$$F = G \cdot (102 \cdot (1 + \gamma) \cdot a + W_o \pm W_\delta), \quad (3)$$

при $a = 0$ (для відрізка II на рис. 2):

$$F = G \cdot (W_o \pm W_\delta), \quad (4)$$

при $a < 0$ (для відрізка III на рис. 2):

$$B = G \cdot (102 \cdot (1 + \gamma) - W_o \pm W_\delta). \quad (5)$$

У (5) при $a < 0$ тягове зусилля F змінено на гальмівне B , а також змінено знак перед основним опором руху W_o . У процесі розрахунку знак перед W_δ залежить від умов руху поїзда (підйом або спуск). Під час руху горизонтальною ділянкою W_δ у виразах (3 – 5) відсутній. У режимі гальмування від джерела енергії (дизеля) споживається лише невелика частина потужності на живлення допоміжних потреб. У зв'язку з цим, у подальших розрахунках витрат енергії використовуються тільки вирази (3) і (4).

На рис. 3 наведено блок-схему алгоритму моделювання і обчислення енергозатрат.



Рис. 3. Блок-схема алгоритму моделювання і обчислення енерговитрат

На рис. 4 наведено функціональну схему моделі обчислення тягового зусилля. Зміна тягового зусилля у функції часу, яка отримана в результаті моделювання ТПС, з урахуванням параметрів дизель-поїзда, наведена на рис. 5. Розгін поїзда (відрізок I) забезпечується постійним тяговим зусиллям із подальшим зниженням зусилля по мірі розгону (рис. 5).

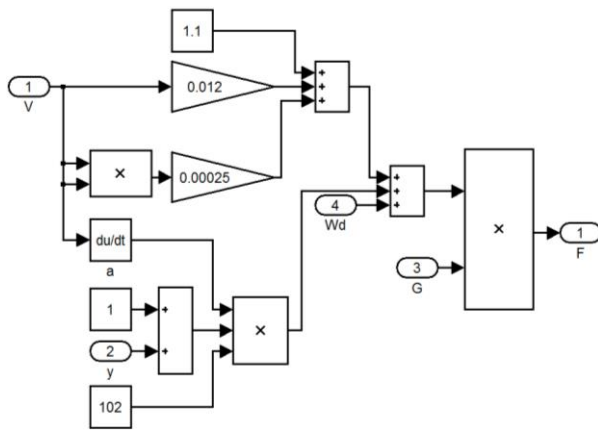


Рис. 4. Функціональна схема обчислення тягового зусилля

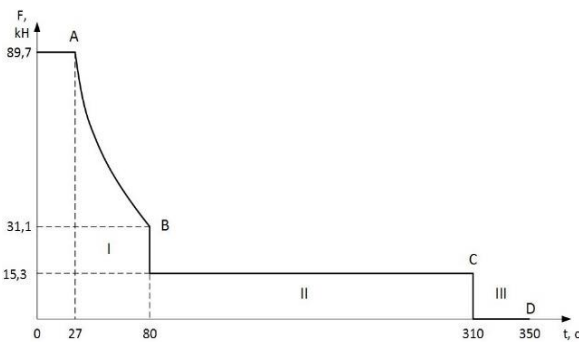


Рис. 5. Залежність $F = f(t)$ дизель-поїзда

Відрізок II відповідає руху поїзда з постійною швидкістю і характеризується мінімальним значенням тяги, достатнім для підтримки цієї швидкості.

На відрізку III – гальмування (при цьому відсутнє тягове зусилля і відбір потужності на тягу). По отриманій тяговій залежності $F = f(t)$ було розраховано потужність на тягових вісях поїзда:

$$P_t = F_t \cdot V_t, \quad (6)$$

де F_t , V_t – значення тягового зусилля і швидкості в конкретний час. Залежність $P = f(t)$ наведено на рис. 6.

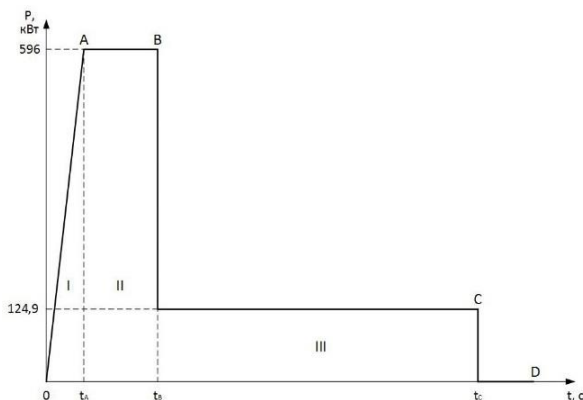


Рис. 6. Залежність $P = f(t)$

Енергія, яку використано поїздом на проходження конкретного відрізка шляху, визначається з

урахуванням коефіцієнта корисної дії електропередачі η_{en} за формулою:

$$W = \frac{1}{\eta_{en}} \left(\int_0^{t_A} P(t) dt + \int_{t_A}^{t_B} P(t) dt + \int_{t_B}^{t_C} P(t) dt \right). \quad (7)$$

Витрати палива отримано за витратними характеристиками дизеля. Для ТРП, що наведено на рис. 2, та з урахуванням параметрів дизель-поїзда ДЕЛ-02 відповідно до запропонованого методу було виконано розрахунок витрат енергії (палива).

Результати розрахунків такі:

1) при розгоні до швидкості 72 км/год витрати енергії складають 11,8 кВт·год;

2) при русі з постійною швидкістю 72 км/год витрати енергії складають 7,98 кВт·год;

3) енергія, яка виділяється при електрогальмуванні дорівнює 2,1 кВт·год.

Загальні витрати енергії складають 19,78 кВт·год, або 3,65 кг дизельного палива.

У більшості схем тягових електропередач енергія гальмування розсіюється на гальмівних резисторах. Особливістю виконання схеми тягової електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02 є підключення допоміжних навантажень і системи опалення пасажирських салонів до вихідних клем силової випрямної установки через відповідний перетворювач, що для конкретного випадку ТРС дає економію палива в кількості 0,4 кг, що складає ~15% витрат палива на власні потреби та опалення пасажирських вагонів.

Висновки

У результаті проведених досліджень для визначення енерговитрат поїздів в експлуатації, запропоновано та обґрунтовано використання ТРП по перегону з відомим профілем та обмеженнями на керування. Визначення енерговитрат виконується за допомогою основного рівняння руху поїзда та розробленої математичної моделі. Наведено розрахунок витрат енергії (палива) для конкретної траєкторії руху дизель-поїзда ДЕЛ-02 з реальними параметрами, які отримані за допомогою ІС.

Подальший розвиток цієї роботи передбачає використання запропонованого методу для знаходження та реалізації на практиці оптимальних режимів щодо використання енергії ТРС

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Енергозберігаючі технології в локомотивному господарстві: навчальний посібник. Част. 1 / Е. Д. Тартаковський, Д. О. Аулін, Д. М. Коваленко, М. О. Котов. Харків: УкрДУЗТ, 2019. 130 с. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/2172>

2. Мозолевич Г. Я., Троян А. В. Енергоєфективне керування поїздопотоком як засіб удосконалення перевізного процесу // Транспортні системи та технології перевезень. Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 10. – 2015. – С. 80 – 87. DOI: <https://doi.org/10.15802/tst2015/57072>
3. Щербак Я. В., Нерубацький В. П. Аналіз варіантів вибору критерію оптимізації енерговитрат на тягові потреби рухомого складу залізниць // Автоматизовані системи електричного транспорту. Збірник наукових праць УкрДАЗТ, Вип. 127. – 2011. – С. 137 – 142. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/4425>
4. Кислий Д. М. Визначення енергозощаджуючих режимів ведення поїздів // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – № 1 (61). – 2016. – С. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983>
5. Сулим А. О., Мельник О. О., Бялобржеський О. В., Ломонос А. І. Дослідження факторів та оцінка рівня їх впливу на показник питомих витрат електроенергії рухомого складу // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – № 4 (268). – 2021. – С. 118 – 127. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-118-127>
6. Боднар Б. С., Капіца М. І., Афанасов А. М., Кислий Д. М. Визначення енергозощаджуючих режимів розгону поїздів. // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – № 5 (59). – 2015. – С. 40 – 52. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55359>
7. Кулагін Д. О. Керування моторвагонним рухомих складом за умови відставання від графіка руху. *Рухомий склад залізниць*. Зб. наук. праць УкрДАЗТ. Вип. 145. 2014. С. 115–119. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.145.2014.81045>
8. Bulakh M. Evaluation and Reduction of Energy Consumption of Railway Train Movement on a Straight Track Section with Reduced Freight Wagon Mass. *Energies*, 18(2), 280, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18020280>
9. Nespoulous J., Soize C., Funfschilling C., Perrin G. Optimisation of train speed to limit energy consumption. *Vehicle System Dynamics*, 60(10), 2021. – P. 3540–3557. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1965628>
10. Носков В. І, Гавриленко С. Ю., Гейко М. В., Панченко В. І. Контроль використання потужності дизеля на тягу в умовах експлуатації дизель-поїздів // Системи управління, навігації та зв'язку. – Том 4. № 78. – 2024. – С. 38 – 41. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.038>

Received (Надійшла) 23.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Носков Валентин Іванович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Valentin Noskov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Valentyn.Noskov@khi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-7879-0706>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57331254200>.

Гавриленко Світлана Юрївна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Svitlana Gavrylenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: e-gavrylenko08@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-6919-0055>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57189042150>.

Скородієлов Володимир Васильович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Skorodielov Volodymyr – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: volodymyr.skorodielov@khi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0008-1728-9089>;

Гейко Максим Вікторович – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Maksym Heiko – PhD student, Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Maksym.Heiko@cs.khi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0008-3164-7815>.

Determining energy consumption using train traffic

Valentin Noskov, Svitlana Gavrylenko, Volodymyr Skorodielov, Maksym Heiko

Abstract. Relevance. Railway transport is one of the main modes of transport in Ukraine. Improving efficiency of its functioning is the main task in its operation. **Object of research:** processes of controlling a diesel train during movement. **Purpose of the article:** to develop a method for assessing the quality of operation of traction rolling stock (TRS) with an autonomous power source by using the train trajectory (TT). To do this, develop a mathematical model for determining the traction force and calculate energy consumption during movement, taking into account the features of constructing the power transmission scheme. **Research results.** The article analyzes existing means of assessing the efficiency of TRS operation with an autonomous power source, develops and justifies a method for determining this assessment using TT. A mathematical model is developed and an example of calculating fuel consumption is given for the case of a real trajectory of a DEL-02 diesel train with parameters that were obtained due to the presence of an information system as part of the control system. **Conclusions.** A method for determining the energy consumption of trains during their operation using TRP has been developed and substantiated, a mathematical model has been created, which is based on the basic equation of train motion.

Keywords: energy consumption, mathematical model, traction rolling stock, train trajectory.

Ю. О. Андрусенко, В. О. Радченко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ У ГЕТЕРОГЕННИХ ГРІД-СИСТЕМАХ З НЕСТАЦІОНАРНИМ ВХІДНИМ ПОТОКОМ

Анотація. Актуальність дослідження зумовлена зростанням масштабів використання гетерогенних грід-систем для виконання обчислювально складних задач в умовах динамічного та нестационарного вхідного потоку. Різномірність обчислювальних ресурсів і нерівномірність навантаження призводять до зниження ефективності використання обчислювальної інфраструктури та потребують застосування адаптивних методів балансування навантаження. **Метою роботи** є підвищення ефективності використання ресурсів гетерогенних грід-систем шляхом розробки та дослідження алгоритмів балансування навантаження на основі імітаційного моделювання в умовах нестационарного вхідного потоку задач. **Об'єктом дослідження** є процеси управління та розподілу обчислювальних ресурсів у гетерогенних грід-системах. **Предметом дослідження** є методи та алгоритми балансування навантаження й оптимізації використання ресурсів гетерогенних грід-систем з нестационарним вхідним потоком задач на основі імітаційного моделювання. **Результати.** У роботі розроблено імітаційну модель гетерогенної грід-системи, що враховує різномірність обчислювальних вузлів та змінну інтенсивність надходження задач. Проведено експериментальні дослідження ефективності алгоритмів балансування навантаження у нормальному та піковому режимах роботи системи. **Висновок.** Отримані результати показали зменшення середнього часу очікування виконання задач, підвищення рівномірності завантаження ресурсів та зростання загальної пропускну здатності системи. **Напрямами подальших досліджень** є розширення імітаційної моделі з урахуванням пріоритетності задач, обмежень якості обслуговування (QoS), енергоспоживання обчислювальних вузлів, а також застосування інтелектуальних і прогнозних методів балансування навантаження у гетерогенних розподілених обчислювальних середовищах.

Ключові слова: грід-система, гетерогенність, нестационарність, балансування навантаження, розподіл ресурсів, обчислювальний вузол.

Вступ

Постановка проблеми. Гетерогенні грід-системи є одним із ключових інструментів реалізації високопродуктивних розподілених обчислень, що забезпечують спільне використання різномірних обчислювальних ресурсів, об'єднаних у єдине інформаційно-обчислювальне середовище. Відмінності у продуктивності вузлів, архітектурі апаратного забезпечення, характеристиках мережевої взаємодії та режимах доступу до ресурсів зумовлюють підвищену складність задач управління такими системами [1].

В умовах нестационарного вхідного потоку задач, коли інтенсивність надходження запитів змінюється у часі та має виражені пікові навантаження, особливої актуальності набуває проблема балансування навантаження між обчислювальними вузлами грід-системи [2]. Неадекватний розподіл задач призводить до перевантаження окремих ресурсів, простою інших вузлів та зниження загальної ефективності функціонування системи [3].

Ефективним інструментом дослідження процесів функціонування гетерогенних грід-систем є імітаційне моделювання, яке дозволяє відтворювати динаміку вхідних потоків, поведінку обчислювальних ресурсів і алгоритмів балансування навантаження без втручання у реальну інфраструктуру. Застосування імітаційних моделей надає можливість аналізувати вплив різних стратегій планування та розподілу ресурсів, оцінювати показники продуктивності,

такі як час очікування задач, коефіцієнт завантаження вузлів і пропускну здатність системи.

Використання імітаційного підходу є особливо доцільним у задачах оптимізації, пов'язаних із нестационарними потоками, оскільки дозволяє враховувати випадковий характер надходження задач, зміну їхніх вимог до ресурсів та адаптивну поведінку алгоритмів балансування [4]. Це створює передумови для розробки та дослідження адаптивних і динамічних методів балансування навантаження, орієнтованих на підвищення ефективності використання ресурсів гетерогенних грід-систем.

Метою роботи є розробка та дослідження імітаційної моделі гетерогенної грід-системи з нестационарним вхідним потоком задач, а також аналіз ефективності алгоритмів балансування навантаження за різних режимів функціонування системи.

Основний матеріал

На додаток до аналізу b-pack ng та оцінки навантаження розглянемо досягнення в алгоритмах балансування навантаження, які можуть дати ідеї для того, щоб запропонувати адекватну техніку розподілу викликів.

VectorDot (VD) [5] - це алгоритм балансування навантаження для роботи з ресурсами в ієрархічних системах розподілених обчислень. Алгоритм натхненний методом Тойоди для багатовимірних ранців. Він дозволяє переміщати VMs, віртуальні сховища та трафік комутаторів з одного вузла на інший без простою працюючого в ньому додатки. Функція «

точкового продукту» описує перевантажені сервери через надмірне використання ЦП, пам'яті, мережі або дискового введення-виводу. Вона використовується для пошуку вузлів серверів або комутаторів для міграції VMs або трафіку. Алгоритм перевірено в ході експериментів як у реальному центрі обробки даних, так і в змодельованій середовищі великомасштабного центру обробки даних.

Virtual Web Resource (VWR) [6] - це алгоритм балансування навантаження для розподілу клієнтських запитів між реплікованими серверами. Він використовує протокол для обмеження швидкості перенаправлення та запобігання навантаження віддалених серверів. Коли сервер перевантажений, він отримує дозвіл на зниження навантаження та перенаправляє перевищуючу навантаження на найближчий веб-сервер із меншим навантаженням. Сервери можуть прийняти або відхилити запит, якщо запит відхилений, то для його виконання вибирається інший сервер.

Стратегія планування при балансуванні навантаження на VM-ресурсах – SVB [7] – це алгоритм балансування навантаження для міграції VMs у середовищі хмарних обчислень. Алгоритм, заснований на генетичних алгоритмах GA, враховує варіації системи, історичні дані та вартість міграції. Він намагається зменшити або уникнути динамічної міграції. Хромосома представлена у вигляді деревоподібної структури. Кореневий вузол – це планування, проміжні вузли – реальні машини, а листові вузли – VMs. Пропонуються відповідні стратегії вибору, гібридизації та варіації. Цей метод здатний реалізувати балансування навантаження та розумне використання ресурсів, коли навантаження на систему стабільна та варіативна.

Honeybee Foraging Behavior (HF) [8] - це децентралізований алгоритм балансування навантаження для великомасштабних хмарних систем. Він динамічно розподіляє вебсервіси на серверах для регулювання системи залежно від попиту. Цей алгоритм використовується для самоорганізації та досягнення глобальною балансування навантаження за допомогою локальних дій сервера. Кожен фізичний сервер групує віртуальні сервери. Поняття « дошка оголошень » використовується для повідомлення про глобальну прибутку колонії. Незайняті сервери читають дошку оголошень, вибирають оголошення та обслуговують запит або випадковим чином обслуговують запит черги серверів.

Particle Swarm Optimization (TBSLB-PSO) [9] – це механізм балансування навантаження для хмарних обчислень. Цей алгоритм використовує центральний планувальник завдань CTS для передачі додаткових завдань з перевантаженою VM на нову аналогічну VM шляхом застосування інформації на дошці. Дошка містить всю інформацію планувальників про характеристики VMs, виконуваних завдань та якість обслуговування QoS. Процес міграції враховує обсяг даних, пам'яті, пропускну здатність і число VMs. Непрацюючі фізичні машини ФМ не будуть обрані як нових хостів для VMs; це дозволяє знизити енергоспоживання.

Теорія мурашиних колоній та складних мереж ACCLB [10] – це механізм балансування навантаження для відкритої федерації хмарних обчислень. Мураха періодично вирушає недовантаженим вузлом для пошуку навантаження. Під час подорожі він запам'ятовує вузол, який має максимальну / мінімальну навантаження, і зупиняється у вузлі, що перевищує поріг навантаження різниці між ax і n або загальна кількість кроків переміщення. Потім мураха повідомляє двом вузлам N ax і N n щоб збалансувати навантаження між ними. Ця система спрямована на рішення складною та динамічною завдання балансування, при цьому враховуються характеристики складної мережі малий світ і свобода від масштабованості.

Event Driven (ED) [11] - це алгоритм балансування навантаження для розрахованих на багато користувачів онлайн- ігор MMOG в реальному часу на хмарних ресурсах. Він представляє собою економічно ефективний хостинг для сесій MMOG Алгоритм використовує подієво-орієнтоване рішення, яке отримує інформацію про пропускну здібності, аналізує її в контексті та приймає рішення про надання послуг. Події пропускну здібності складаються з сесії та ресурсів, статусу події, моніторингу та прогнозування.

Fuzzy Based Round Robin (FBRR) [12] - це алгоритм балансування навантаження на основі нечіткою логіки та RR у центрі обробки даних у хмарі. Він зберігає інформацію про кожну віртуальну машину та їх запити, які в даний час час розподілені. Найменш завантажена машина визначається при вступі запиту на виділення. Фазифікатор враховує швидкість процесора та навантаження VM для балансування системи. Fuzzy Inference System (FIS) імітує прийняття рішень людиною на основі нечітких правил управління та відповідних вхідних лінгвістичних параметрів.

У табл. 1 наведено огляд середовищ алгоритмів балансування навантаження. У табл. 2 представлені основні характеристики алгоритмів, а у табл. 3 узагальнено метрики, використані для вивчення якості алгоритмів, тобто метрики балансування навантаження, що дозволяють оцінити стан ресурсів, якість обслуговування та ефективність розподілу запитів між вузлами системи. Вибір метрик визначається типом середовища та вимогами до продуктивності та надійності.

Наведено основні метрики, що застосовуються в алгоритмах балансування навантаження для оцінювання стану обчислювальних та мережевих ресурсів, вивчають окремий аспект функціонування системи, зокрема рівень завантаження апаратних ресурсів, якість обслуговування користувачів, енергоефективність та надійність вузлів. Метрики, пов'язані з використанням процесора, оперативної пам'яті та дискової підсистеми, дозволяють визначити обчислювальне навантаження та запобігти перевантаженню окремих вузлів. Мережні показники, такі як затримка, пропускну здатність та втрати пакетів, застосовуються для забезпечення якості сервісу та мінімізації часу відкликання системи.

Таблиця 1 – Середовище алгоритмів балансування навантаження

Середовище	Характеристика середовища	Типові алгоритми балансування	Переваги	Недоліки / обмеження
Локальні обчислювальні мережі (LAN)	Невелика кількість вузлів, низькі затримки, стабільні канали зв'язку	Round Robin , Weighted Round Robin	Простота реалізації, мінімальні накладні витрати	Не враховується поточне навантаження вузлів
Кластерні системи	Однорідні або слабо неоднорідні вузли, спільна мета обчислень	Least Connections , Least Load	Вища ефективність використання ресурсів	Потребує постійного моніторингу стану вузлів
Хмарні обчислення (Cloud Computing)	Динамічне масштабування, віртуалізація, змінна кількість ресурсів	Dynamic Load Balancing , Auto-scaling алгоритми	Висока адаптивність, еластичність	Складність реалізації, залежність від провайдера
Розподілені системи	Географічно рознесені вузли, асинхронна взаємодія	Hash-based , Consistent Hashing	Масштабованість, відмовостійкість	Можлива нерівномірність розподілу
Мережі мобільного зв'язку	Висока мобільність користувачів, змінна якість каналів	Load-aware , QoS-based	Підтримка якості сервісу (QoS)	Складність обчислень у реальному часі
Центри обробки даних (ЦОД)	Висока щільність серверів, великі обсяги трафіку	ECMP, Flow-based	Висока пропускна здатність	Не враховує навантаження серверів
Інтернет-сервіси	Велика кількість користувачів, нерівномірний трафік	Least Response Time	Оптимізація часу відгуку	Потребує збору статистики
ІоТ- системи	Обмежені ресурси вузлів, велика кількість пристроїв	Lightweight , Edge-based	Енергоефективність	Обмежена точність балансування

Таблиця 2 – Основні характеристики алгоритмів балансування навантаження

Характеристика	Статичні алгоритми	Динамічні алгоритми	Адаптивні (інтелектуальні) алгоритми
Принцип роботи	Розподіл за наперед заданими правилами	Розподіл з урахуванням поточного стану системи	Розподіл з урахуванням історії та прогнозу навантаження
Урахування стану ресурсів	Не враховуються	Враховуватись частично	Повне урахування
Динамічність	Низька	Середня-висока	Дуже висока
Масштабованість	обмежена	Висока	Дуже висока
Складність реалізації	Низька	Середня	Висока
Накладні витрати	Мінімальні	Помірні	Значні
Затримка прийняття рішень	Мінімальна	Помірна	Вища через аналіз даних
Відмовостійкість	Низька	Середня	Висока
Справедливість розподілу	обмежена	Висока	Оптимізована
Підтримка QoS	Відсутня	Часткова	Повна
Адаптація до змін середовища	Відсутня	обмежена	Повна
Енергетична ефективність	Низька	Середня	Висока
Типові алгоритми	Round Robin, Hashing	Least Connections	Reinforcement Learning
Сфера застосування	Малі системи, LAN	ЦОД, веб-сервіси	Хмарні системи, 5G, ІоТ

Таблиця 3 – Метрики балансування навантаження

Метрика	Опис	Що характеризує	Де застосовується
Завантаження CPU	Використання процесору	Навантаження вузла	Кластери, ЦОД, Cloud
Використання ОП	Обсяг зайнятої RAM	Ресурсні обмеження вузла	Віртуалізовані середовища
Пропускна здатність мережі	Обсяг даних годину	Мережеве навантаження	Розподілені системи, 5G
Затримка (Latency)	Час доставки	Швидкодію системи	Реальної години, URLLC
Час відгуку	Час: відповіддю – запит	Якість обслуговування	Веб-сервіси, API
Число активних з'єднань	Число відкритих сесій	Навантаження сервера	Load balancer рівня L4/L7
Втрати пакетів	Частина втрачених пакетів	Якість мережі	Мобільні мережі
Рівень використання диска	Швидкість та обсяг I/O	Стан підсистеми зберігання	Бази даних, сховища
Енергоспоживання	Споживання вузлом	Енергоефективність	ІоТ , “зелені” ЦОД
Надійність вузла	Імовірність відмови	Стійкість системи	Критичні системи
Пріоритет трафіку (QoS)	Важливість потоку	Гарантія сервісу	4G/5G, MC мережі
Відхилення навантаження	Різниця між вузлами	Баланс системи	Аналітична оцінка
Пропускна здатність	Число оброблених запитів	Загальну продуктивність	Високонавантажені системи
Година простою вузла	Період неактивності	Неоптимальне використання	ЦОД, серверні ферми

Окрему групу складатимуть метрики, орієнтовані на продуктивність та ефективність роботи системи в цілому, зокрема пропускну здатність, кількість активних з'єднань та середнє відхилення навантаження. Також у таблиці враховано енергетичні та надійнісні показники, що є критично важливими для

хмарних середовищ, центрів обробки даних та мобільних мереж. Таким чином, наведені метрики є основою для прийняття рішень у процесі балансування навантаження та дозволяють адаптувати алгоритми до вимог конкретної середовища функціонування системи.

Приклад: оптимізація використання ресурсів у гетерогенних грид-системах з нестационарним вхідним потоком

Розглянемо гетерогенну грид-систему, що складається з обчислювальних вузлів із різною продуктивністю процесорів, обсягом оперативної пам'яті та пропускною здатністю мережі. У систему надходить нестационарний вхідний потік завдань, інтенсивність якого змінюється в годині, наприклад, відповідно до добових піків навантаження або випадкових сплесків запитів. Для оптимізації використання ресурсів застосовується динамічний алгоритм балансування навантаження, який у реальному часі аналізує такі метрики: завантаження CPU, обсяг вільної оперативної пам'яті, кількість активних завдань на вузлі та середня година виконання завдань. На основі зібраної інформації формується важливий показник доступності шкірного вузла, який визначає його пріоритет для обробки нових завдань.

У періоди низької інтенсивності вхідного потоку задачі рівномірно розподіляються між вузлами з урахуванням їх продуктивності, що забезпечує максимальне використання обчислювальних ресурсів. У моменти різкого зростання навантаження алгоритм адаптивно перенаправляє нові завдання на менш завантажені та більш продуктивні вузли, а також може тимчасово обмежувати призначення завдань на вузли з високим рівнем завантаження.

Результатом такого підходу є зменшення середньої години очікування завдань, підвищення пропускної здатності грид-системи та зниження ймовірності перевантаження окремих вузлів. Таким чином, адаптивне балансування навантаження дозволяє ефективно оптимізувати використання ресурсів у гетерогенних грид-системах в умовах нестационарного вхідного потоку.

Введемо інтегральний показник вибору вузла

$$S_i = \alpha \cdot \frac{1}{CPU_i} + \beta \cdot \frac{1}{MEM_i} + \gamma \cdot \frac{1}{Q_i},$$

де CPU_i – завантаження процесора, MEM_i – використання пам'яті, Q_i – довжина черги завдань, α, β, γ – вагові коефіцієнти, $\alpha + \beta + \gamma = 1$.

Нехай гетерогенна грид-система складається з трьох обчислювальних вузлів N_1, N_2 та N_3 . Вагові коефіцієнти вибрано такими: $\alpha = 0.5, \beta = 0.3, \gamma = 0.2$.

Поточний стан вузлів та розрахунок інтегрального показника наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Аналіз поточного стану вузлів

Вузол	CPU_i	MEM_i	Q_i	S_i
N_1	0.70	0.60	5	1.254
N_2	0.50	0.80	8	1.400
N_3	0.30	0.40	3	2.484

Найбільше значення інтегрального показника отримано для вузла N_3 : $S_3 > S_2 > S_1$. Отже, нове завдання необхідно призначити вузлу N_3 , оскільки він має найменше завантаження процесора, нижче використання пам'яті та коротку чергу завдань.

Графік рис. 1 демонструє зростання значення показника $S(t)$ у часі, що свідчить про зменшення навантаження на вузол внаслідок адаптивного перерозподілу завдань. Після початкового періоду спостерігається стабілізація показника, що вказує на досягнення квазістационарного режиму роботи системи.

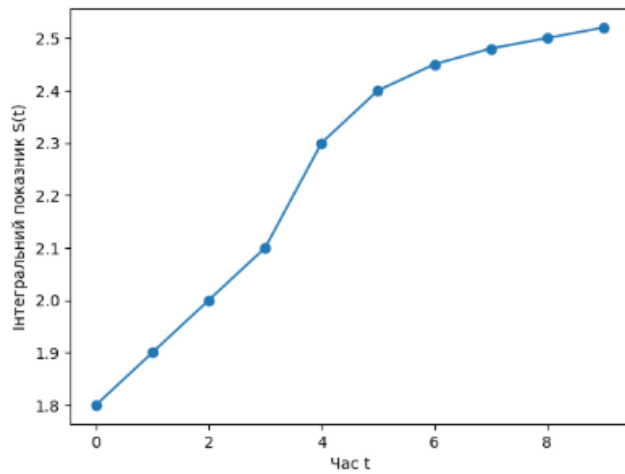


Рис. 1. Зміна інтегрального показника $S_i(t)$ у часі

Зміна інтегрального показника $S_i(t)$ у часі підтверджує ефективність адаптивного алгоритму балансування, що забезпечує стабілізацію навантаження в умовах нестационарного вхідного потоку.

Висновки

У роботі досліджено проблему оптимізації використання обчислювальних ресурсів у гетерогенних грид-системах в умовах нестационарного вхідного потоку задач. Показано, що різномірність обчислювальних вузлів і динамічний характер навантаження істотно ускладнюють процеси планування та розподілу задач, що потребує застосування адаптивних методів балансування навантаження. Проаналізовано існуючі підходи до балансування навантаження у розподілених обчислювальних системах та обґрунтовано доцільність використання імітаційного моделювання як ефективного інструмента дослідження поведінки грид-систем у різних режимах функціонування. Отримані результати підтвердили, що застосування адаптивних алгоритмів балансування навантаження забезпечує зменшення середнього часу очікування виконання задач та покращення загальної пропускної здатності грид-системи порівняно з базовими методами розподілу задач.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Radchenko, V. and Andrusenko Yu. (2025), "Intelligent approach to planning taking into account the concept of acceptable work balance", *Control, Navigation and Communication Systems*, Vol. 4, No. 82 (2025), pp. 121–125, doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.4.121>
2. Hung, P.T., Truong, M.D.D., Hung, P.D. (2022). Tuning Proximal Policy Optimization Algorithm in Maze Solving with ML-Agents. In: Singh, M., Tyagi, V., (eds) *Advances in Computing and Data Sciences*. ICACDS 2022. Communications in Computer and Information Science, vol 1614. Springer, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-12641-3_21
3. Jothi, G., and Saravanan, P. (2017), "A New Algorithm to Find the Optimal Feasible Assignment for an Assignment Problem", *Int. journal of engineering research & technology*, vol. 5, issue 04, doi: <https://doi.org/10.17577/IJERTCONV5IS04013>
4. Tan, M. & Le, Q. V. Efficientnetv2: Smaller models and faster training. ArXiv (Cornell University), Preprint arXiv:2104.00298, 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.00298>
5. Kuchuk, H. and Malokhvii, E. (2024), "Integration of IOT with Cloud, Fog, and Edge Computing: A Review", *Advanced Information Systems*, vol. 8(2), pp. 65–78, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.2.08>
6. Kristensen, J.T., Valdivia, A. and Burelli, P. (2020), "Estimating player completion rate in mobile puzzle games using reinforcement learning", *Proc. of the IEEE Conference Computational Intelligence and Games*, pp. 636–639, doi: <https://doi.org/10.1109/CoG47356.2020.9231581>
7. Zhu, W. and Rosendo, A. (2021), "A functional clipping approach for policy optimization algorithms". *IEEE Access*, vol. 9, pp. 96056–96063, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3094566>
8. Barabash, O., Bandurka, O., Svychnuk, O. & Tverdenko, H. Method of identification of tree species composition of forests on the basis of geographic information database. *Advanced Information Systems*, 2022, vol. 6, no. 4, pp 5-10. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.4.01>
9. Yaloveha, V., Podorozhniak, A. & Kuchuk, H. CNN hyperparameter optimization applied to land cover classification. *Radioelectronic and computer systems*, 2022, no. 1 (101), pp. 115-128. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2022.1.09>
10. He, K., Zhang, X., Ren, S. & Sun, J. Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 770-778. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
11. Singh, U., Dey, M., and Patel, P. (2025), "Enabling Grid Stability: Harnessing μ PMU Data for Data-Driven Analysis of Grid Frequency Event", *Smart Innovation Systems and Technologies*, 422, pp. 99–112, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-96-0147-9_9
12. Sharma, R., Goel, A.K., Sharma, M.K., Dhiman, N., Mishra, V.N. (2023), "Modified Round Robin CPU Scheduling: A Fuzzy Logic-Based Approach", *Lecture Notes in Operations Research*, Part F3787, pp. 367–383, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-19-8012-1_24

Received (Надійшла) 29.10.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Андрусенко Юлія Олександрівна – асистентка кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Yuliia Andrusenko – Assistant Lecturer of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: 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>.

Радченко В'ячеслав Олексійович – старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Viacheslav Radchenko – Senior Lecturer of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: viacheslav.radchenko@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-5782-1932>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57189376280>.

Parallel implementation of voice signal processing methods on multicore CPU and GPU

Viacheslav Radchenko, Yuliia Andrusenko

Abstract. The relevance of this study is driven by the growing scale of using heterogeneous grid systems to execute computationally intensive tasks under conditions of a dynamic and non-stationary input flow. The heterogeneity of computing resources and uneven workload distribution lead to reduced efficiency of the computing infrastructure and necessitate the use of adaptive load-balancing methods. **The aim of this work** is to improve the efficiency of resource utilization in heterogeneous grid systems by developing and studying load-balancing algorithms based on simulation modeling under conditions of a non-stationary task input flow. The object of the study is the processes of management and allocation of computing resources in heterogeneous grid systems. The subject of the study is methods and algorithms for load balancing and optimization of resource utilization in heterogeneous grid systems with a non-stationary task input flow based on simulation modeling. **Results.** A simulation model of a heterogeneous grid system was developed, taking into account the heterogeneity of computing nodes and the variable intensity of task arrivals. Experimental studies of the efficiency of load-balancing algorithms were conducted under normal and peak operating modes of the system. **Conclusion.** The obtained results demonstrated a reduction in the average waiting time for task execution, improved uniformity of resource utilization, and increased overall system throughput. Future research directions include extending the simulation model to account for task prioritization, quality of service (QoS) constraints, energy consumption of computing nodes, as well as applying intelligent and predictive load-balancing methods in heterogeneous distributed computing environments.

Keywords: grid system, heterogeneity, non-stationarity, load balancing, resource allocation, computing node.

М. Е. Бондаренко, Г. С. Іващенко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

БАГАТОВЕКТОРНА ГОЛОСОВА ІДЕНТИФІКАЦІЯ КОРИСТУВАЧА З УРАХУВАННЯМ ФОНЕТИЧНИХ ВАРІАЦІЙ ГОЛОСУ

Анотація. Актуальність. Системи голосової ідентифікації широко застосовуються в біометричних системах контролю доступу, персоналізованих застосунках та інтелектуальних інтерфейсах, у яких основною вимогою є надійне розпізнавання користувачів з урахуванням індивідуальних варіацій голосу. Традиційні підходи, що ґрунтуються на статичних векторних представленнях фонетичних мовленнєвих ознак, демонструють обмежену здатність адаптації до нових даних зібраних при довготривалій експлуатації системи біометричної ідентифікації. Це зумовлює зростання похибок через поступові зміни акустичних характеристик та індивідуальних параметрів голосу мовця. **Об'єкт дослідження:** процес формування та оновлення векторних профілів користувачів та їх використання у системах голосової ідентифікації. **Мета статті:** розробка адаптивного методу ідентифікації мовця на основі багатовекторного профілю ознак з оновленням векторних представлень. **Результати дослідження.** Запропоновано метод оновлення векторного профілю ознак, що забезпечує адаптивне формування голосового профілю користувача та підтримує його актуальність у процесі подальшої експлуатації, забезпечуючи можливість поступового донавчання. Проведені експериментальні дослідження в умовах фізіологічних змін голосу та середовища запису показали, що використання багатовекторного подання дозволяє знизити показник FRR порівняно із використанням статичних профілів та оновленням лише домінантного вектору. **Висновки.** Результати підтверджують доцільність застосування адаптивного багатовекторного профілю ознак для підвищення стійкості та точності систем ідентифікації мовця.

Ключові слова: біометричні системи, системи голосової ідентифікації, ідентифікація мовця, голосовий сигнал, вектор ознак, багатовекторний профіль ознак, фонетичні зміни голосу, адаптивне оновлення, FAR, FRR.

Вступ

Постановка проблеми. Голосова біометрія застосовується для ідентифікації та аутентифікації користувачів, контролю доступу, забезпечуючи надійну перевірку особи без необхідності фізичного контакту або використання додаткових носіїв інформації [1]. Однією з основних переваг систем голосової ідентифікації є низька вартість апаратного забезпечення та простота використання. Для здійснення ідентифікації користувачеві достатньо промовити контрольну фразу або довільний вислів, що зумовлює широке застосування таких систем в фінансових установах, колл-центрах та сервісах віддаленого обслуговування клієнтів [2].

Системи голосової ідентифікації мають ряд обмежень, серед яких слід зазначити чутливість до змін акустичного оточення, фізіологічних варіацій голосу у людини (через втому, захворювання, старіння), а також наявність технологій синтезу або підробки аудіо, що можуть бути використані для обходу біометричної перевірки [3].

Для вирішення вказаних обмежень перед безпосередньою ідентифікацією голосовий сигнал проходить декілька етапів попередньої обробки, таких як видалення шумів, нормалізація гучності та частоти, виділення характеристик спектру сигналу та формування векторних представлень, що служать цифровим описом голосу [1, 4]. Така підготовка дозволяє зменшити вплив акустичних змін середовища та технічних особливостей запису, а також полегшує порівняння сигналів між різними сеансами.

Після формування векторних представлень голосу проводиться ідентифікація шляхом зіставлення вхідного сигналу з загальним банком записів, який містить еталонні голосові зразки всіх зареєстрованих користувачів і слугує для оцінки подібності [5].

Зазвичай кожний користувач представлений одним еталонним вектором (домінантним вектором), який отримується шляхом усереднення декількох записів, отриманих під час реєстрації користувача. Таке представлення дозволяє швидко оцінити схожість голосу користувача із збереженими профілями та прийняти рішення про підтвердження або відмову в доступі. Усереднення векторних представлень або використання одного домінантного вектора часто не дозволяє врахувати внутрішньокласову різноманітність голосових характеристик одного користувача, що включає зміни тембру, інтонації та темпу мовлення. Це негативно впливає на точність і надійність системи ідентифікації, особливо при коротких висловлюваннях або наявності фонового шуму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для компенсації обмежень підходу з одиничним вектором у сучасних дослідженнях [6, 7] пропонуються методи, що використовують декілька векторних представлень мовця та комбіновані схеми оцінки подібності. Один із поширених підходів полягає у використанні кількох векторів ознак, які відображають акустичні характеристики та стилі мовлення, різні умови запису (зокрема тип і якість мікрофона, відстань до джерела звуку, акустичні властивості приміщення та рівень реверберації, наявність і інтенсивність фонового шуму), співвідношення сигнал/шум, характеристики каналу передавання, а також параметри оцифрування сигналу (частота дискретизації та бітова глибина). Крім того, такі векторні представлення можуть бути отримані з різних моделей або сформовані у різних ознакових просторах [8-10]. При порівнянні нового сигналу обчислюється схожість із усіма наявними представленнями, а фінальне рішення формується на основі агрегації результатів багатьох зіставлень шляхом застосування багатокomпонентних схем оцінювання. Такий

підхід дозволяє ефективніше враховувати міжсесійні варіації голосу, каналові викривлення та зміни акустичного середовища, підвищуючи робастність та точність ідентифікації.

Водночас багатовекторні підходи мають суттєві обмеження: вони істотно збільшують обчислювальне навантаження, потребують більше пам'яті для зберігання векторів ознак, є чутливими до вибору метрик подібності та способів агрегації результатів, а також складно інтегруються у системи, де передбачено використання лише одного еталонного вектора на кожного користувача [10-12].

Окремі рішення потребують значних обсягів даних і складного налаштування гіперпараметрів для навчання та адаптації моделей до нових умов [11], а інші залишаються неадаптивними, фіксуючи набір векторів після початкової реєстрації мовця без можливості їх інкрементального оновлення в процесі експлуатації системи [12]. Статистичні моделі, зокрема PLDA (Probabilistic Linear Discriminant Analysis), також дозволяють враховувати внутрішньокласову варіативність, проте потребують додаткових даних і обчислювальних ресурсів [13].

Розглянуті дослідження підтверджують, що ідентифікація користувача за голосом залишається складною задачею через змінність акустичного середовища, умов запису та фонетичних характеристик голосу, таких як інтонація, наголос і тембр. Використання багатокомпонентних систем оцінки і інтеграція кількох векторних ознак дозволяє підвищити точність і стійкість моделей до фонових шумів, викривлень сигналу та міжсесійних варіацій голосу. Водночас ефективність таких підходів значною мірою залежить від параметризації правил агрегації результатів, вибору метрик подібності та топології ознакового простору. Додатково, складні архітектури нейронних мереж або багаторазові порівняння векторів ознак зумовлюють високі обчислювальні витрати, обмежуючи використання систем голосової ідентифікації у реальному часі.

Метою роботи є розробка методу голосової ідентифікації мовця на основі багатовекторного профілю ознак із застосуванням адаптивного оновлення, що забезпечує підтримку актуального голосового профілю користувача.

Постановка задачі

Ідентифікація користувача за голосом представляє собою комплексну задачу, що потребує формування таких векторів ознак, які відображають індивідуальні особливості голосу та дозволяють надійно розрізняти різних мовців. Класичні підходи використовують один вектор для кожного користувача, що дозволяє швидко здійснювати порівняння, проте недостатньо ефективні в умовах міжсесійних варіацій голосу, шумових перешкодах та змін акустичного середовища.

Пропонується багатовекторний підхід, що дозволяє комбінувати декілька представлень голосу мовного профілю користувача.

Реалізація запропонованого методу голосової ідентифікації повинна передбачати багатовекторне

зберігання ознак користувача, що дозволяє ефективно використовувати пам'ять і забезпечувати високу точність та відтворюваність результатів ідентифікації. У роботі необхідно дослідити вплив структури та способу оновлення векторних представлень на результати ідентифікації користувачів за голосом.

Основний матеріал

Після попередньої обробки сигналу [1] кожен голосовий запис перетворюється на багатовимірний вектор ознак, що відображає спектральні, енергетичні та часові характеристики голосу, такі як MFCC. Векторне представлення ознак дозволяють кількісно порівнювати голосові записи за допомогою косинусної схожості, евклідової відстані або інших метрик.

На етапі ідентифікації новий вхідний вектор ознак порівнюється з вектором користувача, збереженим у базі даних. У класичних системах цей вектор представляє собою статичний голосовий профіль користувача, що інтегрує інформацію про його мовлення з попередніх записів.

Пропонується підхід на основі багатовекторного представлення ознак користувача, де один вектор (домінантний) має найбільший вплив на прийняття рішення, а допоміжні вектори компенсують варіативність характеристик голосу та умов запису. Після етапу попередньої обробки та виділення базових ознак для кожного голосового запису система ідентифікації формує структурований профіль користувача (1), що складається з доміантного вектора та набору допоміжних векторів, готового до використання в процесі ідентифікації:

$$V = \{v_c, v_1, v_2, \dots, v_N\}, \quad (1)$$

де v_c – доміантний вектор, який інтегрує інформацію про попередні успішні ідентифікації та визначає основну подібність нового запису до профілю користувача, $v_{i=1 \dots N}$ – допоміжні вектори, що враховують варіації голосу та умов запису. Кількість допоміжних векторів N визначається залежно від необхідної робастності та наявного обсягу пам'яті.

У запропонованому багатовекторному підході кожен з 10 векторів ознак має власний ваговий коефіцієнт, що визначає його вплив на фінальне рішення системи ідентифікації. Домінантний вектор користувача отримує найбільший ваговий коефіцієнт α_c , оскільки він відображає найактуальніші характеристики голосу. Допоміжні вектори, що відповідають записам з попередніх сесій перевірки користувача, отримують поступово зменшувані коефіцієнти, що дозволяє компенсувати вплив змін голосу та умов запису:

$$\alpha_c > \alpha_1 \geq \alpha_2 \geq \dots \geq \alpha_N, \quad \sum_{i=0}^N \alpha_i = 1. \quad (2)$$

Здатність системи забезпечувати коректне розрізнення голосів користувачів досягається шляхом підбору значень ваг на наборах записів у складних акустичних умовах, зокрема за наявності шуму, реверберації, варіативності тембру та інших фізіологічних особливостей голосу.

Зміна параметра α_c визначає чутливість системи до нових записів, тоді як використання допоміжних векторів (v_1, v_2, \dots, v_N) дозволяє враховувати природні міжсесійні зміни голосу користувача без збирання застарілих даних та надмірного обсягу даних профілю. Зменшення ваг допоміжних векторів може призвести до втрати робастності системи, а надмірне збільшення – до зниження чутливості до нових записів. Для оцінки того, наскільки вхідний вектор ознак v_{xid} відповідає вектору профілю v_i , використовується міра збіжності між ними. Ця міра (ступінь подібності) показує, наскільки схожі два вектори у багатовимірному ознаковому просторі.

Ступінь подібності визначається на основі косинусної міри, нормованої в межах від 0 до 1: 0 відповідає повній відмінності напрямків векторів, а 1 – їхній повній збіжності, тобто максимальної схожості за акустичними характеристиками голосу:

$$\text{sim}_{\cos}(v_i, v_{xid}) = \frac{v_i \cdot v_{xid}}{\|v_i\| \cdot \|v_{xid}\|}. \quad (3)$$

Підсумкова оцінка схожості між вхідним вектором та профілем користувача обчислюється як зважена сума індивідуальних значень подібності:

$$S = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot \text{sim}(v_i, v_{xid}), \quad (4)$$

де α_i – ваговий коефіцієнт вектору профілю, причому

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1, \quad \alpha_i \geq 0. \quad (5)$$

Найбільший коефіцієнт ($\alpha_c = 0.4$) присвоюється домінуючому вектору, оскільки він репрезентує останній успішний результат і має значущий вплив на остаточне рішення системи.

Коефіцієнт 0.2 присвоюється найновішому допоміжному вектору α_1 , який раніше (у попередній сесії голосової ідентифікації) був домінуючим, що дозволяє зберегти дані про недавні голосові сесії без надмірного впливу на фінальне рішення. Допоміжні вектори поступово зменшують свій вплив:

$$\alpha_2 = 0.12, \alpha_3 = 0.10, \dots, \alpha_9 = 0.02).$$

Актуалізація векторів ознак після кожної спроби ідентифікації забезпечує здатність системи адаптуватися до міжсесійних і фізіологічних змін голосу користувача та виконувати поступове донавчання під час використання. Зображений на рис. 1 процес дозволяє зберігати актуальні характеристики голосу у пріоритетних векторах багатовекторного профілю та одночасно компенсувати варіації минулих сесій.

Коли новий вхідний запис x успішно ідентифікований, він стає новим домінуючим вектором v_c^{new} , зсуваючи на наступні позиції попередній домінуючий та допоміжні вектори у багатовекторному профілі ознак. Допоміжний вектор, який перебуває на кінцевій позиції багатовекторного профілю, видаляється, що дозволяє обмежити розмір профілю та покращити використання пам'яті. У разі неуспішної ідентифікації жоден з векторів не оновлюється,

що зберігає попередній стан профілю користувача та забезпечує робастність системи.

У випадках, коли багатовекторний профіль ознак користувача ще не сформований повністю, наповнення його векторів передбачає поступове формування: перший успішно ідентифікований запис стає домінуючим вектором v_c , а наступні успішні записи послідовно додаються як допоміжні вектори v_1, v_2, \dots , досягнувши максимальної заданої кількості N . При цьому вагові коефіцієнти закріплюються за відповідними позиціями векторів у багатовекторному профілі, що забезпечує збереження структури кожного компонента, тоді як самі вектори послідовно оновлюються: домінуючий вектор зберігає найбільший вплив, а нові допоміжні вектори отримують поступово зменшувані значення. Такий підхід забезпечує адаптивне формування профілю користувача після перших ідентифікацій і реакцію системи ідентифікації на можливі майбутні зміни голосу та умов запису.

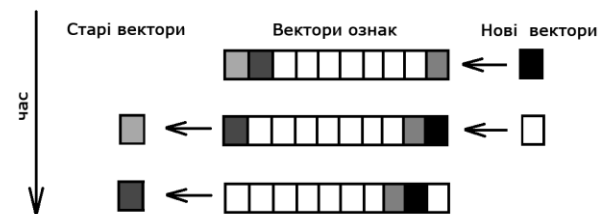


Рис. 1. Процес оновлення векторів ознак

Обчислення схожості виконується за допомогою бібліотеки Faiss, яка призначена для ефективного пошуку найближчих сусідів у великих векторних просторах [14]. Faiss забезпечує як точний, так і наближений пошук у багатовимірних просторах векторних ознак, підтримує апаратне прискорення за допомогою GPU та паралельне виконання обчислень із використанням багатопоточності на CPU.

Для оцінки ефективності системи необхідно проаналізувати роботу при різних обсягах даних, якості записів та наповненості векторів ознак у голосовому профілю користувача.

Результати експериментальних досліджень

Експериментальна модель системи ідентифікації користувача на основі голосових сигналів розгорнута в середовищі Jupyter Notebook. Модель передбачає використання CPU і GPU для виконання різних етапів обробки та порівняння векторів ознак. Рівні хибного прийняття (FAR) та хибного відхилення (FRR) є основними критеріями оцінки помилок у системах голосової ідентифікації, відображаючи загальну чутливість і точність системи. FAR показує частку випадків, коли система помилково приймає сторонній голос за власного користувача, а FRR – коли система помилково відхиляє власного користувача, навіть якщо його вектори ознак присутні в банку системи.

Результати першого експерименту, наведені в табл. 1, показують вплив різних способів оновлення векторного профілю користувача на точність ідентифікації. Порівнювалися статичний профіль без оновлення, оновлення лише домінуючого вектора

та повне оновлення векторного профілю (запропоноване рішення). Експерименти проводилися на даних у стандартних умовах та за складних акустичних умов, із профілями різної векторної розмірності (одновекторний та багатовекторний підхід). Враховувалися фонові шуми, зокрема вулиці та кондиціонера, а також фонетичні варіації голосу: швидка мова, різна інтонація та зміни артикуляції.

Таблиця 1 – Значення помилок FAR та FRR при різних способах оновлення вектору ознак

Умови експериментів	Спосіб оновлення векторів					
	Не оновлюється		Лише домінуючий вектор		Повне оновлення	
	FAR, %	FRR, %	FAR, %	FRR, %	FAR, %	FRR, %
Профіль з 1 вектору	5.1	4.3	3.7	3.2	1.1	1.2
Профіль з 10 векторів	6.4	7.2	4.1	3.9	1.3	1.4
Наявність шуму	10.1	11.4	9.4	9.2	4.3	3.7
Складні умови запису	11.3	12.5	9.9	11.3	4.8	3.7
Фонетичні зміни голосу	24.4	28.3	12.3	11.9	1.8	1.3

Використаний датасет містить записи, що відображають фізіологічні зміни голосу мовця, зумовлені втому, емоційними чинниками або природними коливаннями. Адаптивне переміщення векторів ознак у просторі ознак дозволило підтримувати стабільну точність ідентифікації. Для тестових сценаріїв із шумами, викривленнями та фонетичними варіаціями голосу користувача використовувався профіль із десяти векторів ознак. Аналіз отриманих результатів показав, що використання неоновлюваного профілю користувача характеризується найгіршими показниками точності, зокрема підвищеним рівнем відмов у розпізнаванні за умов змінних характеристик голосу. Оновлення лише домінуючого вектора частково покращує результати, однак не забезпечує повної компенсації варіативності голосових параметрів мовця. Повне оновлення векторного банку забезпечує найвищу стабільність і точність, суттєво знижуючи FRR навіть у складних акустичних умовах.

В ході другого експерименту досліджувався вплив загальної кількості векторів у профілі ознак користувача на ефективність ідентифікації мовця при використанні запропонованого способу оновлення. Розглядалися три конфігурації: профіль користувача представлений одним вектором; профіль користувача із обмеженою кількістю в десять векторів; та необмежений профіль користувача, у якому всі нові вектори зберігалися без видалення попередніх. В табл. 2 наведені результати експериментів, в ході яких максимальний обсяг профілю одного користувача накопичував 100 векторів.

Таблиця 2 – Значення помилок (FAR, FRR) та часу виконання при різній кількості векторів ознак у профілях користувачів

Кількість векторів ознак у профілі	FAR, %	FRR, %	Час обробки, с
1	7.1	27.1	0.8
10	3.1	3.5	2.9
Необмежене накопичування (100 векторів)	2.5	2.8	12.5

Використання необмеженого профілю векторів ознак дозволяє дещо знизити FRR, проте збільшення числа векторів супроводжується зростанням обчислювальної складності та апаратного навантаження, що робить обмежений профіль ознак більш доцільним для практичного застосування.

Висновки

Реалізовано адаптивний підхід оновлення векторного профілю ознак у системі ідентифікації мовця, що передбачає використання домінуючого та набору допоміжних векторів із фіксованими ваговими коефіцієнтами. Запропонований метод забезпечує оновлення векторів ознак користувача при надходженні нових голосових сигналів, при цьому домінуючий вектор замінюється новим, а попередній стає допоміжним, тоді як допоміжні вектори зміщуються для компенсації впливу варіацій голосу та умов запису. Такий підхід дозволяє формувати актуальний профіль користувача після перших сесій ідентифікації та підтримувати його актуальність протягом довготривалої роботи системи.

На відміну від PLDA та metric-based підходів, запропонований метод розглядає внутрішньокласову варіативність записів одного користувача не як шум, а як джерело дискримінаційної інформації, що забезпечує ідентифікацію спікера при фізіологічних змінах голосу чи у складних умовах запису. Експериментальні результати показують, що адаптивне оновлення векторів підтримує стабільну точність ідентифікації, зменшуючи вплив варіацій голосових ознак.

Подальшим розвитком запропонованого підходу є впровадження адаптації вагових коефіцієнтів залежно від ступеня схожості нових векторних представлень до поточного профілю.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бондаренко М. Е., Іващенко Г. С. Використання послідовності методів попередньої обробки в системах голосової ідентифікації. Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава: ПНТУ. 2025. № 2 (80). С. 90-96. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.2.090>

2. Samonte M. J. C., Callejo J. K., Lumbea D. C. N., Ocaya J. C. B. Mitigating Vishing in Digital Banking Through Caller Authentication and Verification Technologies. 2024 14th International Conference on Software Technology and Engineering ICSTE, Macau, China, 2024, pp. 102-108. <https://doi.org/10.1109/ICSTE63875.2024.00025>
3. Parida S., Mukharjee T., Panda S., Pati B. Deep-Detector: Deepfake Voice Recognition using Machine Learning. 2025 Int. Conf. on ICC (ICoICC), Bhubaneswar, 2025, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICoICC64033.2025.11052136>
4. Бондаренко М. Е., Іващенко Г. С. Організація паралельного виконання методів обробки голосових сигналів на багатоядерних CPU та GPU. Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава: ПНТУ. 2025. № 4 (82). С. 39-44. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.4.39-44>
5. Feng C., Leer E., Anderson D. V. Identification of Voice Quality Variation Using I-Vectors. 2019 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA), New Paltz, NY, USA, 2019, pp. 105-109. <https://doi.org/10.1109/WASPAA.2019.8937289>
6. Shrestha R. Speaker Recognition using Multiple X-Vector Speaker Representations with Two-Stage Clustering and Outlier Detection Refinement. IEEE Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Pervasive Intelligence and Computing, Falerna, Italy, 2022, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/DASC/PiCom/CBDCCom/Cy55231.2022.9927875>
7. Rahimi A., Afouras T., Zisserman A. Voicevector: Multimodal Enrolment Vectors for Speaker Separation. 2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Workshops (ICASSPW), Seoul, Korea, Republic of, 2024, pp. 785-789. <https://doi.org/10.1109/ICASSPW62465.2024.10627309>
8. Zhang J., Liss J., Jayasuriya S., Berisha V. Robust Vocal Quality Feature Embeddings for Dysphonic Voice Detection. IEEE/ACM Trans. on ASL Proc., vol. 31, pp. 1348-1359. <https://doi.org/10.1109/TASLP.2023.3261753>
9. Yi L., Mak M. W. Disentangled Speaker Embedding for Robust Speaker Verification. 2022 IEEE Int. Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Singapore, 2022, pp. 7662-7666. <https://doi.org/10.1109/ICASSP43922.2022.9747778>
10. Tiwari, V. K. Speaker identification using multi-modal i-vector approach for varying length speech in voice interactive systems. Cognitive Systems Research, vol. 57, 2019, pp. 66-77. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2018.09.028>
11. Zhang Y., Bi Z., Xiao F., Yang X., Zhu Q., Guan J. Attacking Voice Anonymization Systems with Augmented Feature and Speaker Identity Difference. 2025 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Hyderabad, India, 2025, pp. 1-2. <https://doi.org/10.1109/ICASSP49660.2025.10889535>
12. Peng S., Sugiyama K., Liu X., Mine T. Balancing Embedding Spectrum for Recommendation. ACM Transactions on Recommender Systems, vol. 3(4), 2025, pp. 1-25. <https://doi.org/10.1145/3718488>
13. Wan Q., Bouchard M. Performance evaluation of mixtures of PLDA and conventional PLDA for a small-set speaker verification system. 2017 IEEE 30th CCECE, Windsor, ON, Canada, 2017, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2017.7946645>
14. Douze M., Guzhva A., Deng C., Johnson J., Szilvasy G. The Faiss library. IEEE Transactions on Big Data. 2025, pp. 1-17. <https://doi.org/10.1109/TBDATA.2025.3618474>

Received (Надійшла) 19.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Іващенко Георгій Станіславович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Heorhii Ivashchenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: heorhii.ivashchenko@nure.ua; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0003-1027-5262>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57217030807>.

Бондаренко Максим Едуардович – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Maksym Bondarenko – PhD student at the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: maksym.bondarenko@nure.ua; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-2500-7626>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216159508>.

Multidimensional vector voice user identification, including phonetic variations of the voice

Maksym Bondarenko, Heorhii Ivashchenko

Abstract. Relevance. Voice identification systems are widely used in biometric access control systems, personalised applications, and intelligent interfaces, where the primary requirement is reliable user recognition, taking into account individual voice variations. Traditional approaches based on static vector representations of phonetic speech features demonstrate limited ability to adapt to new data collected during long-term exploitation of a biometric identification system. It leads to an increase in errors due to gradual changes in the acoustic characteristics and individual parameters of the speaker's voice. **Object of research** is the process of forming and updating vector profiles of users and use in voice identification systems. **Purpose of the article** is to develop an adaptive method for speaker identification based on a multidimensional vector feature bank with updated vector representations. **Research results.** The proposed method of updating the vector bank ensures adaptive formation of the user's voice profile and maintains its relevance during further operation, providing the possibility of gradual retraining. Experimental studies performed under conditions of physiological changes in voice and recording environment variations have shown that the use of multidimensional vector representation allows reducing the FRR compared to the use of static profiles or updating only the dominant vector. **Conclusions.** The results confirm the feasibility of using an adaptive multidimensional vector feature bank to improve the stability and accuracy of speaker identification systems.

Keywords: biometric systems, voice identification systems, speaker identification, feature vector, vector comparison, multidimensional vector trait profile, physiological voice changes, adaptive updating, FAR, FRR.

Bohdan Hirianskyi, Bogdan Bulakh

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

EFFECTIVENESS OF EVOLUTIONARY ALGORITHMS IN NEURAL NETWORK OPTIMIZATION TASKS: UNCONDITIONAL MINIMIZATION, PRUNING, AND HYPERPARAMETER OPTIMIZATION

Abstract. Relevance. Modern neural networks contain a significant number of redundant parameters, which increases training time, energy consumption, and hardware requirements. Standard gradient methods tend to get trapped in local minima on multimodal tasks; magnitude pruning ignores the structural importance of layers. Zero-cost proxies, particularly SynFlow, estimate architecture viability via signal propagation capacity without full training, yet their applicability boundaries remain insufficiently explored. **Object of study:** neural network optimization methods. **Objective:** a systematic experimental comparison of evolutionary, gradient-based, and Bayesian methods within a unified framework, with an emphasis on the role of SynFlow as a proxy for evaluating genome (architecture) fitness. **Results.** At extreme sparsity (98%), the combination of CMA-ES + SynFlow (signal propagation capacity analysis) with the addition of mathematical energy compensation overcomes network degradation and achieves State-of-the-Art performance ($F1 = 0.81$). This approach outperforms both classic magnitude pruning and gradient-based soft mask methods (SoftMask), requiring orders of magnitude less computational cost compared to approximate training-based approaches. At moderate sparsity ($\leq 90\%$), magnitude pruning retains its superiority. In hyperparameter optimization (HPO), CMA-ES achieves practical equivalence with Optuna TPE in terms of solution quality, while in high-dimensional settings, it requires orders of magnitude less execution time. Using SynFlow as an objective function in HPO allows for accelerating the search by over 250 times, but yields inferior final accuracy compared to full training. **Conclusions:** Evolutionary algorithms are effective for multimodal tasks and structural optimization problems; for differentiable weight training tasks, Adam prevails ($F1 \approx 0.97$ on Digits). Zero-cost proxies are context-specific.

Keywords: evolutionary algorithms; CMA-ES; neural networks; optimization; compression; pruning; efficiency; deep learning; zero-cost metrics; architecture search; AutoML; hyperparameter optimization; models; analysis; Bayesian optimization; neuroevolution; gradient-based methods; Adam.

Introduction

Problem Statement. Modern neural networks contain a significant number of redundant parameters, which increases training time, energy consumption, and hardware resource requirements. Gradient-based methods are effective on smooth unimodal landscapes but tend to get trapped in local minima during multimodal tasks. Common magnitude pruning heuristics fail to account for the structural importance of individual layers. Hyperparameter optimization requires a global search in complex spaces, where evolutionary algorithms are proposed as a flexible alternative.

Zero-cost proxies, particularly SynFlow, evaluate architecture "viability" by analyzing signal propagation capacity without full training — which radically reduces computational costs (GPU-hours). A key advantage from the perspective of evolutionary search efficiency is that SynFlow allows for filtering out unviable genomes (degraded architectures) without the GPU costs of full training, thereby reducing expenses by orders of magnitude. However, the limits of applicability of such metrics across different tasks remain insufficiently explored.

Analysis of Recent Research and Publications. CMA-ES has demonstrated the ability to effectively solve unconstrained optimization problems in continuous spaces [1, 2] and successfully competes with Bayesian approaches in the HPO of deep networks [3].

The "lottery ticket" hypothesis [3] confirms the existence of sparse subnetworks capable of achieving comparable quality after retraining. Evolutionary pruning with layer-wise threshold adjustment [5–8] demonstrates a better trade-off between quality and

complexity, although the cost is the high computational expense of using training as a fitness criterion.

Zero-cost proxies, particularly SynFlow [9], evaluate architectures without access to data and can correlate with final quality [10–12]. Combining multiple proxies increases the reliability of the evaluation [13]. Bayesian optimization (Optuna TPE) is effective for a wide range of HPO tasks [14], but evolutionary methods remain competitive on non-stationary landscapes [3]. The question of using zero-cost proxies as a direct objective function remains open.

The objective of this work is an experimental evaluation of the effectiveness of evolutionary algorithms in tasks of unconstrained minimization, structural pruning, and hyperparameter optimization of neural networks on the Digits and FashionMNIST datasets (MLP and CNN architectures), as well as presenting the combination of evolutionary search with zero-cost proxies for pruning tasks and its experimental verification, including network hyperparameter search during automated training. Two key tasks are defined:

- to evaluate the synergy of SynFlow + CMA-ES for structural pruning at various sparsity levels and compare it with magnitude pruning and approximate training-based approaches;
- to investigate CMA-ES in HPO compared to Bayesian optimization and test the viability of SynFlow as an objective function for CMA-ES in this setting.

An important problem in modern structural pruning is the so-called violation of error monotonicity at compression levels exceeding 95%. At moderate sparsity levels, simple heuristics such as magnitude pruning successfully remove redundant parameters. However, in

the "death zone" (98% and above), the removal of even a minor fraction of critical weights leads to the energetic collapse of activations and the destruction of gradient flows. Under such conditions, classic zero-cost proxies, particularly SynFlow, lose their predictive capability, as they are guided exclusively by static network topology and do not account for signal variance changes after parameter pruning.

In contrast to heuristic approaches, state-of-the-art gradient methods utilize differentiable soft masks (SoftMask) [15, 16], allowing pruning thresholds to be optimized via gradient descent. However, such methods are computationally expensive. This creates an urgent need for the development of closed-loop (State-Aware) evolutionary algorithms that combine the speed of zero-cost methods with the accuracy of learning-based methods, dynamically adapting to the network's reaction to pruning.

Methodology

Task Classes and Data. Three classes of tasks are investigated: (1) unconstrained optimization – Rastrigin, Ackley (multimodal) and Sphere, Rosenbrock (unimodal) benchmark functions; (2) structural pruning – classification on Digits (MLP) and FashionMNIST (CNN), with sparsity levels ranging from moderate to extreme (98%); (3) hyperparameter optimization (HPO) – FashionMNIST, encompassing learning rate, momentum, regularization, batch size, and architectural elements.

Methods.

- **Evolutionary:** CMA-ES (primary), L-SHADE, CLPSO; evolutionary pruning with layer-wise sparsity coefficient selection. State-of-the-art modifications of evolutionary search were additionally investigated: energy compensation of pruned weights (EnergyComp) and activation norm adaptation (SymWanda). Fitness criteria included full/approximate training or SynFlow. The method of differentiable soft masks (SoftMask) was used as the strongest gradient baseline.

- **Gradient-based:** Adam, AdamW, NAdam, AdaBelief. Adam serves as the main baseline for weight training.

- **HPO:** CMA-ES, Differential Evolution, Optuna TPE (Parzen-tree estimator).

Zero-cost Proxies and Signal Propagation Capacity. SynFlow evaluates architecture "viability" by analyzing value flows along the edges of the computational graph without real data. The metric quantitatively characterizes signal propagation capacity: architectures with higher SynFlow better preserve gradient flow during pruning. A key advantage from the perspective of evolutionary search efficiency is that SynFlow allows for filtering out unviable genomes without the GPU costs of full training. In structural pruning, SynFlow serves as the objective function for CMA-ES, optimizing the vector of layer-wise sparsity coefficients.

Compensation and Adaptation Mechanisms in Evolutionary Search. To overcome the limitations of the baseline Evo-SynFlow method at extreme sparsity levels (98%), we implemented three advanced modifications of the evolutionary engine:

1. **Evo-SynFlow (EnergyComp)** integrates a mathematical energy compensation mechanism. After

applying a binary mask to the layer's weights, the algorithm scales the remaining parameters by the ratio of the original to the pruned output signal's variance. This preserves the overall activation energy. Additionally, instead of the classic linear SynFlow product, the non-linear State-of-the-Art zero-cost metric Pruner-Zero is used, which is more robust to gradient anomalies:

2. **Evo-SynFlow (Adaptive)** implements a self-adaptive evolution paradigm. Instead of a static schedule, CMA-ES uses multi-step selection (Fast Fitness): in the first stage, all candidate masks are evaluated in a single fast iteration, and only the Top-30% undergo deep evaluation.

Furthermore, the population size dynamically changes based on the Success Rate metric: the algorithm narrows the population to save time in easy regions and expands it upon hitting local minima.

3. **SoftMask-Grad** is a gradient-based soft mask method used as the strongest benchmark. Instead of evolutionary selection, the pruning threshold is transformed into a trainable parameter optimized via a sigmoid function and a Straight-Through Estimator (STE) with logarithmic regularization of the target parameter budget.

Protocol and Statistics. A fixed computational budget was applied for each task class; several independent runs with different initial conditions were performed (reporting mean and standard deviation). Comparisons utilized the Friedman test (ranking across a set of tasks) combined with the pairwise Wilcoxon test, evaluating the effect size. Metrics included accuracy and F1-score; for pruning, the relative mask search time was additionally considered.

Hyperparameter Optimization (HPO) Protocol. A DynamicMLP architecture on the FashionMNIST dataset was used to evaluate HPO performance. Optimization was conducted in a mixed 6-dimensional space comprising both continuous and discrete/categorical parameters: learning rate, batch size (32, 64, 128, 256), number of hidden layers (from 1 to 4), number of neurons per layer (from 32 to 512), dropout coefficient (from 0.0 to 0.5), and optimizer type (Adam or SGD). To ensure the correct operation of the CMA-ES evolutionary strategy in such a space, a specialized decoder was employed, mapping continuous real-valued vectors into valid hyperparameter values using a sigmoid transformation. The search was conducted with a budget of 25 trials and averaged over 5 independent runs (seeds) to guarantee the statistical significance of the results (Wilcoxon test and Friedman ranking).

The effectiveness of evolutionary search (CMA-ES) was investigated under three fitness evaluation strategies:

1. **Standard (Full training):** classic model training for 3 epochs on 10% of the training set.

2. **Proxy (Approximate training):** ultra-fast surrogate evaluation for 1 epoch on only 2% of the data.

3. **SynFlow (Zero-cost evaluation):** evaluation of the initialized network without a single weight update step on one micro-batch using the gradient flow preservation metric.

The modern Bayesian optimizer Optuna (TPE algorithm) served as the baseline for comparison with the

identical trial budget and standard (Standard) training configuration.

Results

3.1. Unconstrained Optimization On the multimodal Rastrigin function ($\text{dim} = 10$) with a fixed evaluation budget, CMA-ES achieves an average objective function value of 12.43 ± 17.75 (minimum 1.03), which is an order of magnitude lower than that of AdamW and AdaBelief. Friedman ranks are: CMA-ES — 1.05; AdamW — 2.05; Random Search — 2.90; AdaBelief — 4.00 ($p \approx 0$). Vargha-Delaney effect sizes of $A = 1$ relative to Random Search and $A \approx 0.08$ relative to AdamW confirm the dominance of CMA-ES. The execution time for CMA-ES is 0.26 baseline units versus 0.07 for Random Search — an acceptable cost for qualitative superiority.

On the extended set (Rastrigin, Ackley, Sphere, Rosenbrock), a systematic dependence on the landscape type is observed: CLPSO and L-SHADE achieve better ranks on multimodal functions (Rastrigin, Ackley), while gradient-based methods prevail on unimodal ones (Second-order Clipped — rank 1.00 on Sphere; CMA-ES — rank 2.00 on Rosenbrock). The choice of method should be tailored to the landscape characteristics of the task.

3.2. Neural Network Weight Training Under a fixed time budget, Adam consistently outperforms evolutionary algorithms across all three datasets (Moons, Classification-20, Digits): Adam holds a rank of 1.00 on each of them ($p \approx 0$ per the Friedman test). On Moons: Adam $F1 = 0.99$; CMA-ES $F1 = 0.83$; L-SHADE and Random Search are even lower. On Digits: Adam's average $F1$ -score is ≈ 0.97 (with a low standard deviation), whereas CMA-ES and CLPSO demonstrate significantly lower values and higher variance. The Number of Function Evaluations (NFE) is higher for EAs: Adam expends 16.7k evaluations, CMA-ES — 30.6k, Random Search — 122.6k. For differentiable weight training tasks where gradients are available, evolutionary algorithms do not serve as a competitive replacement.

3.3. Structural Pruning Series 1 (Digits, MLP).

At moderate sparsity, magnitude pruning prevails: at 90%, accuracy is 0.900 vs. evolutionary search 0.631, Random 0.597. At 95%, ranks converge (Magnitude 1.45; Evolution 1.95; Random 2.60), but Magnitude remains the leader. The time for evolutionary search is orders of magnitude larger (≈ 0.89 s) compared to Magnitude/Random (≈ 0.02 s) — the advantage does not justify the cost.

Series 2 (Digits, MLP, layer-wise coefficient search). Evolutionary optimization of the layer-wise coefficient vector (EvoA) at extreme sparsity yields $F1 = 0.62$ at 96% sparsity, compared to $F1 = 0.36$ for magnitude pruning and $F1 = 0.21$ for Random — nearly twice the quality. EvoA time is ≈ 9.4 – 9.8 baseline units versus ≈ 0.08 – 0.09 for Magnitude/Uniform: a two-order of magnitude difference, but the final quality justifies the expense given the critical importance of preserving network functionality.

Series 3 (FashionMNIST, CNN, fitness evaluation comparison). LAMP-CMA (CMA-ES with approximate training as a criterion) achieves $F1 = 0.78$ at 98% sparsity

(rank 1.30) — the highest quality. One-Shot-NAS (a single training-free evaluation) yields $F1 = 0.42 \pm 0.26$ (rank 3.80) — the worst result with high variance. At 50–95% sparsity, SET and Magnitude remain competitive (ranks 1.6–2.2). The time for LAMP-CMA is ≈ 174 – 211 baseline units, while Magnitude takes ≈ 12 – 14 .

Key result – extended investigation at extreme compression (98%). Since classic methods suffer from an "energy collapse" at 98% sparsity (Magnitude drops to $F1 = 0.75$, baseline Evo-SynFlow to 0.75), an ablation study of advanced optimization mechanics was conducted (Fig. 1) [15–18]. The integration of mathematical energy compensation of pruned weights into the evolutionary search (Evo-SynFlow Energy Comp) established a new State-of-the-Art, achieving the highest quality $F1 = 0.81$ with a moderate search time (6.66 baseline seconds).

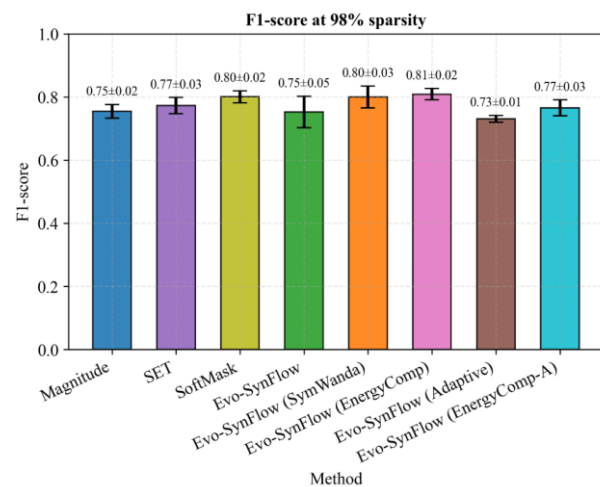


Fig. 1. Graph of the $F1$ of the methods at 98% FashionMNIST (CNN)

To compare two fundamental search paradigms, we contrasted the evolutionary approach (Evo-SynFlow) with the most advanced gradient method based on differentiable soft masks (SoftMask). Although the SoftMask [15] method maintained quality at $F1 = 0.80$, it proved to be the most computationally expensive (25.70 s, Fig. 2).

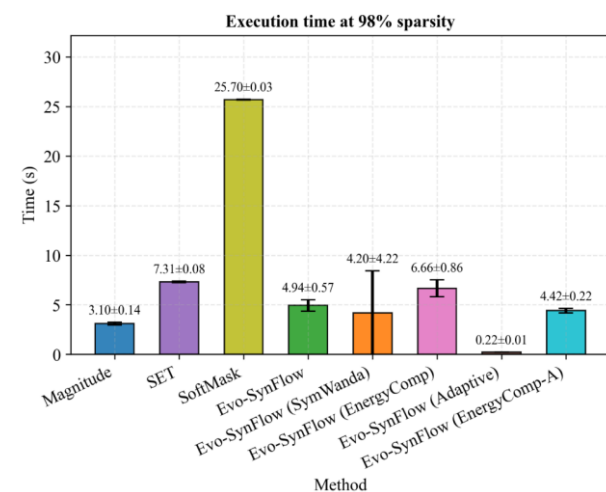


Fig. 2. Time graph of methods at 98% compression of FashionMNIST (CNN).

In contrast, evolutionary methods form a clear Pareto trade-off: the Evo-SynFlow (Adaptive) version with an adaptive population size and multi-step selection reduces the search time to an unprecedented 0.22 s, albeit at the cost of F1 degrading to 0.73. Meanwhile, the dynamic sparse training method (SET) showed intermediate results (F1 = 0.77, time 7.31 s, Fig. 3).

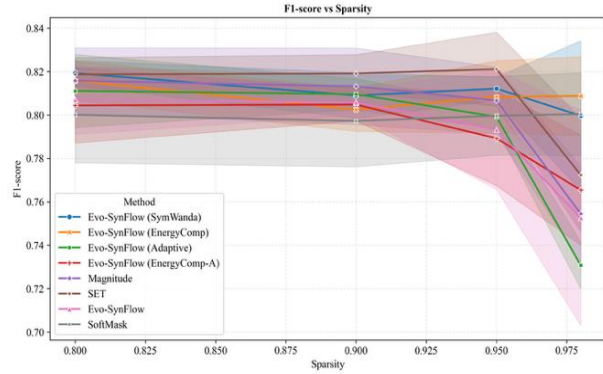


Fig. 3. Dependence of F1-measure on the level of sparsity for methods on FashionMNIST (CNN).

Generalized results of structural pruning demonstrate: magnitude pruning is effective at moderate sparsity ($\leq 90\%$); layer-wise evolutionary selection of sparsity coefficients is critically important at extreme sparsity; the integration of energy compensation into CMA-ES + SynFlow is the best State-Aware solution, beating both gradient (SoftMask) and dynamic (SET) methods in terms of the quality-to-computational-cost ratio.

4. Hyperparameter Optimization

Series 1 (equal budget, 6D). CMA-ES: 0.814 ± 0.018 ; Optuna TPE: 0.812 ± 0.004 . Wilcoxon $p = 1.000$ – the difference is not significant. The methods are practically equivalent in quality; the time for CMA-ES is higher (137.95 baseline units vs. 98.91 for Optuna).

Series 2 (extended comparison, 30 trials). Friedman ranks by best accuracy: CMA-ES — 1.60; Random Search — 2.60; Optuna TPE — 2.70; DiffEvo — 3.10. Best accuracy: CMA-ES 0.825 ± 0.010 ; Optuna 0.820 ± 0.013 ; DiffEvo 0.816 ± 0.010 . Time: Optuna is the lowest (95.47 baselines), DiffEvo is the highest (648.89 baselines) — despite having the worst rank. Under a constrained budget (12 trials): CMA-ES 0.801 ± 0.015 , Optuna 0.794 ± 0.024 , DiffEvo 0.785 ± 0.013 — CMA-ES retains supremacy.

Series 3 (high dimensionality, 12D). CMA-ES: Best_Acc = 0.818, time = 0.37 baselines; Optuna TPE: Best_Acc = 0.819, time = 85.52 baselines. The quality is practically identical (a difference of 0.001), but the time for Optuna is two orders of magnitude higher — a key practical advantage of CMA-ES in resource-constrained scenarios (Fig. 4).

Limitations of SynFlow in HPO. Ranks of CMA-ES variants: Standard — 1.80; Proxy — 2.20; Optuna — 2.50; SynFlow — 3.50. Best accuracy: Standard 0.822 ± 0.015 , SynFlow — 0.812 (the worst). Friedman test $p = 0.18$ — globally, the difference between methods does not reach the significance threshold (Fig. 5).

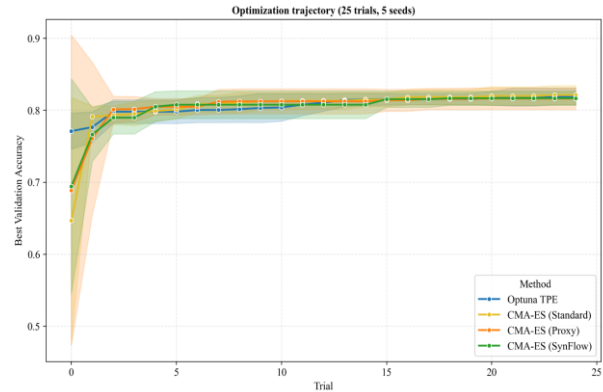


Fig. 4. Graph of convergence of hyperparameter search

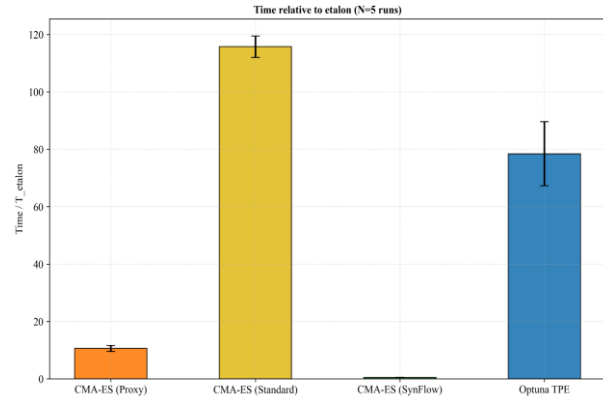


Fig. 5. Graph of time spent searching for hyperparameters

In the space of training hyperparameters (learning rate, batch size, regularization), signal propagation capacity is not a valid surrogate - zero-cost proxies are context-specific. Generalized HPO results (Fig. 6):

CMA-ES ,à Optuna TPE in quality under equal trial budgets;

CMA-ES has the best average rank; differential evolution is the weakest;

the advantage of CMA-ES is maintained under a minimal budget (12 trials);

in a high-dimensional HPO space, quality parity is achieved at orders of magnitude less time;

SynFlow as a fitness function for CMA-ES in HPO is an ineffective strategy.

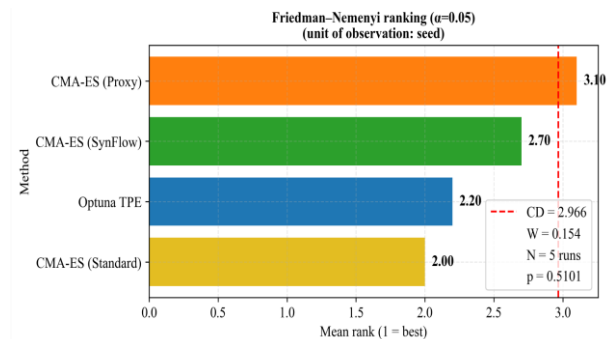


Fig. 6. Friedman and Nemeni rank

Statistical Evaluation of Results (Friedman-Nemenyi Test). To ultimately confirm the statistical significance of the obtained results in both structural pruning and hyperparameter optimization tasks, a non-

parametric Friedman test was applied, followed by a post-hoc Nemenyi test. The analysis of mean method ranks showed that the advantage of the leaders is not a statistical anomaly. Specifically, the discrepancy in average ranks between the proposed evolutionary approach (Evo-SynFlow EnergyComp in pruning and CMA-ES Standard in HPO) and the baseline methods exceeds the calculated Critical Difference (CD) threshold at a significance level of $\alpha=0.05$. This mathematically proves their statistically significant superiority over the baselines on the given samples.

4. Discussion and Limitations

The results form a holistic picture of the niche for evolutionary algorithms. On multimodal landscapes, evolutionary strategies perform global searches where local gradient information is insufficient. On differentiable weight training tasks, gradient methods remain more effective under equal resource constraints.

The analysis of results at the 98% sparsity level clearly illustrates the formation of a Pareto trade-off between computational cost and pruning quality. On one end of the spectrum are heavy gradient methods (SoftMask, 25.7 s), which optimize masks directly through the loss function. On the other end is the highly efficient Evo-SynFlow Adaptive (0.22 s), which sacrifices accuracy for speed. The optimal Pareto solution turns out to be the evolutionary approach with energy compensation (Evo-SynFlow EnergyComp), which closes the control loop (Closed-loop): it is guided not only by the pruning percentage but also accounts for the statistical properties (variance) of the signal, compensating for the shock of weight removal.

This result fundamentally proves that "blind" (Open-loop) adaptation of search hyperparameters, which relies solely on a given sparsity percentage, exhausts itself at extreme compression levels. State-Aware systems, capable of autonomously calibrating weight importance using non-linear proxy functions (Pruner-Zero) without needing full backpropagation, gain the upper hand.

The HPO results demonstrate that not all ideas from structural pruning transfer to other classes of tasks. SynFlow, effective as a proxy for evaluating architectural decisions, proves unsuitable as a surrogate in the training hyperparameter space. This highlights the context-specificity of zero-cost proxies.

Limitations: two datasets (Digits, FashionMNIST), medium-scale architectures (MLP, CNN). External validity may differ for other data types or massive models (LLM scale).

5. Conclusions

A systematic experimental study of the effectiveness of evolutionary algorithms in tasks of unconstrained minimization, structural pruning, and HPO of neural networks is presented. Main conclusions:

- **Evolutionary optimization for structural pruning.** At extreme 98% sparsity, integrating mathematical energy compensation into the Evo-SynFlow (EnergyComp) method allows overcoming gradient collapse and achieving an F1 quality of 0.81 in 6.66 baseline seconds. This surpasses both baseline magnitude pruning (F1 = 0.75) and resource-intensive gradient soft mask methods (SoftMask, F1 = 0.80 at 25.7 s). At moderate sparsity ($\leq 90\%$), simple magnitude heuristics maintain superiority. Layer-wise evolutionary pruning is viable specifically at extreme sparsity.

- **CMA-ES in HPO.** Ranked 1.60 out of four methods; accuracy 0.825 ± 0.010 — the highest. At 12 trials, CMA-ES 0.801 vs. Optuna 0.794, DiffEvo 0.785. In 12D: CMA-ES quality (0.818) \approx Optuna (0.819) with a time 230 times smaller (0.37 vs. 85.52 baselines).

- **The role of SynFlow in hyperparameter optimization.** Unlike structural pruning, using SynFlow as an objective function in HPO provides extreme search acceleration (over 250 times compared to full training). Although this approach falls behind classic CMA-ES in final accuracy (rank 2.70 vs. 2.00), it outperforms approximate training surrogate methods (Proxy). Zero-cost proxies are promising for rapid hyperparameter prototyping, but full training is necessary to achieve State-of-the-Art quality.

- **Landscape dependence.** CMA-ES: Friedman rank 1.05 on Rastrigin; Adam: F1 = 0.99 on Moons, F1 \approx 0.97 on Digits — dominating differentiable weight training tasks.

- **Layer-wise sparsity tuning (evolutionary optimization).** At 96% sparsity: F1 = 0.62 versus 0.36 for Magnitude and 0.21 for Random — nearly twice the performance at a time of 9.4–9.8 baselines vs. 0.08–0.09.

- **CMA-ES robustness to budget constraints.** At 12 trials, CMA-ES retains the first rank (2.00 out of 4); Random — 2.20; Optuna — 2.60; DiffEvo — 3.20.

Conflict of Interest. The authors declare that they have no conflict of interest regarding this research, including financial, personal, authorship, or other issues that could affect the study and its results presented in this article.

Use of Artificial Intelligence Tools. The authors confirm that artificial intelligence technologies were not used in the creation of the presented work.

REFERENCES

1. Hansen N., Ostermeier A. Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies // Evolutionary Computation. 2001. Vol. 9, No. 2. P. 159–195. <https://doi.org/10.1162/106365601750190398>
2. Hansen N. The CMA Evolution Strategy: A Tutorial <https://arxiv.org/abs/1604.00772>
3. Loshchilov I., Hutter F. CMA-ES for Hyperparameter Optimization of Deep Neural Networks <https://arxiv.org/abs/1604.07269>
4. Frankle J., Carbin M. The lottery ticket hypothesis: finding sparse, trainable neural networks // Proc. ICLR. 2019. <https://arxiv.org/abs/1803.03635>
5. Ding Y., Chen D.-R. Optimization based layer-wise pruning threshold method for accelerating CNNs // Mathematics. 2023. Vol. 11, No. 15. Art. 3311. <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/15/3311>
6. Poyatos J. et al. EvoPruneDeepTL: An evolutionary pruning model for transfer learning based deep neural networks // Neural Networks. 2023. Vol. 158. P. 59–82. <https://arxiv.org/abs/2202.03844>

7. Chung K. T. et al. Multi-objective evolutionary architectural pruning of deep convolutional neural networks with weights inheritance // Information Sciences. 2024. Vol. 685. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1016/j.ins.2024.121265>
8. Tang S. et al. DarwinLM: Evolutionary Structured Pruning of Large Language Models <https://arxiv.org/abs/2502.07780>
9. Tanaka H., Kunin D., Yamins D. L. K., Ganguli S. Pruning neural networks without any data by iteratively conserving synaptic flow // Proc. NeurIPS. 2020. <https://arxiv.org/abs/2006.05467>
10. Abdelfattah M. S., Mehrotra A., Dudziak Ł., Lane N. D. Zero-cost proxies for lightweight NAS // Proc. ICLR. 2021. <https://arxiv.org/abs/2101.08134>
11. Krishnakumar A. et al. NAS-Bench-Suite-Zero: Accelerating Research on Zero Cost Proxies // Proc. NeurIPS (Datasets and Benchmarks). 2022. <https://arxiv.org/abs/2210.03230>
12. Li Y. et al. Extensible and Efficient Proxy for Neural Architecture Search // Proc. ICCV. 2023. P. 6199–6210. [https://openaccess.thecvf.com/content/ICCV2023/papers/Li_Extensible_and_Efficient_Proxy_for_Neural_Architecture Search_ICCV_2023_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content/ICCV2023/papers/Li_Extensible_and_Efficient_Proxy_for_Neural_Architecture_Search_ICCV_2023_paper.pdf)
13. Lee J., Ham B. AZ-NAS: Assembling Zero-Cost Proxies for Network Architecture Search // Proc. CVPR. 2024. P. 5893–5903. https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2024/html/Lee_AZ-NAS_Assembling_Zero-Cost_Proxies_for_Neural_Architecture_Search_CVPR_2024_paper.html
14. Akiba T., Sano S., Yanase T., Ohta T., Koyama M. Optuna: a next-generation hyperparameter optimization framework // Proc. KDD. 2019. <https://doi.org/10.1145/3292500.3330701>
15. Liu K., Wang R., Gao J., Chen K. Differentiable model scaling using differentiable topk // Proc. ICML. 2024. <https://arxiv.org/abs/2405.07194>
16. Dong P., Li L., Tang Z., Liu X., Pan X., Wang Q., Chu X. Pruner-zero: Evolving symbolic pruning metric from scratch for large language models // Proc. ICML. 2024. <https://arxiv.org/abs/2406.02924>
17. Sieberling O., Kuznedev D., Kurtic E., Alistarh D. EvoPress: Accurate Dynamic Model Compression via Evolutionary Search // arXiv:2410.14649. 2024. <https://arxiv.org/abs/2410.14649>
18. Yu P., Wang J., Sui X., Ling N., Wang W., Jiang W. Efficient Post-Training Pruning of Large Language Models with Statistical Correction // arXiv:2602.07375. 2026. <https://arxiv.org/abs/2602.07375>

Received (Надійшла) 08.12.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Гірянський Богдан Петрович — аспірант, кафедра системного проектування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Bohdan Hirianskyi — Postgraduate Student, Department of System Design, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine;

e-mail: giryanskibogdan@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0000-6580-7268>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=60018706000>.

Булах Богдан Вікторович — кандидат технічних наук, доцент, кафедра системного проектування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Bogdan Bulakh — PhD, Associate Professor, Department of System Design, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine;

e-mail: bogdan.bulakh@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-5880-6101>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55817517600>.

Ефективність еволюційних алгоритмів у задачах оптимізації нейронних мереж: безумовна мінімізація, прунінг та гіперпараметрова оптимізація

Б. П. Гірянський, Б. В. Булах

Анотація. Актуальність. Сучасні нейронні мережі містять значну кількість надлишкових параметрів, що збільшує час навчання, споживання енергії та вимоги до апаратних ресурсів. Стандартні градієнтні методи схильні застрягати в локальних мінімумах на мультимодальних задачах; magnitude pruning не враховує структурну важливість шарів. Метрики нульової вартості (zero-shot proxies), зокрема SynFlow, оцінюють «живучість» архітектури через signal propagation sparsity без повного навчання, проте межі їх застосовності залишаються недостатньо з'ясованими. **Об'єкт дослідження:** методи оптимізації нейронних мереж. **Мета статті:** систематичне експериментальне порівняння еволюційних, градієнтних та байєсівських методів у єдиній рамці з акцентом на ролі SynFlow як проху для оцінки придатності геномів (архітектур). **Результати дослідження.** При екстремальній sparsity (98 %) комбінація CMA-ES + SynFlow (аналіз signal propagation sparsity) із додаванням математичної компенсації енергії дозволяє подолати деградацію мережі та досягти State-of-the-Art якості ($F1 = 0,81$), перевершуючи як класичний magnitude pruning, так і градієнтні методи м'яких масок (SoftMask), при цьому вимагаючи на порядки меншої обчислювальної вартості порівняно з підходами на основі наближеного навчання. При помірній sparsity ($\leq 90\%$) перевагу зберігає magnitude pruning. У гіперпараметровій оптимізації CMA-ES досягає практичної еквівалентності з Optuna TPE за якістю рішень, а у високовимірній постановці — при на порядки меншому часі роботи. SynFlow як цільова функція у НРО дозволяє прискорити пошук у понад 250 разів, проте поступається повному навчанню за кінцевою точністю рішень. **Висновки:** еволюційні алгоритми доцільні на мультимодальних задачах та задачах структурної оптимізації; для диференційованих задач навчання ваг переважає Adam ($F1 \approx 0,97$ на Digits). Zero-cost proxies є контекстно специфічними.

Ключові слова: еволюційні алгоритми; CMA-ES; нейронні мережі; оптимізація; компресія; прунінг; ефективність; глибоке навчання; метрики, нульова вартість; пошук архітектур; AutoML; оптимізація гіперпараметрів; моделі; аналіз; байєсівська оптимізація; нейроєволюція; градієнтні методи, Adam.

М. І. Главчев, Ю. М. Главчева, М. В. Ліпчанський, О. І. Баленко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

ТРИРІВНЕВА СИСТЕМА ВЕРИФІКАЦІЇ ГРАФІЧНОГО КОНТЕНТУ НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ НА ОСНОВІ ТОПОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ

Анотація. **Об'єкт дослідження** – процес верифікації графічного контенту наукових публікацій. Предмет дослідження – методи та алгоритми виявлення плагіату графічної інформації на основі аналізу змісту даних. **Метою роботи** є розробка та обґрунтування трирівневої системи верифікації графічного контенту наукових публікацій. **Результати дослідження.** У статті запропоновано новий комплексний метод виявлення плагіату графічної інформації у наукових публікаціях. На відміну від існуючих систем (Proofig, Imagetwin), що виявляють лише візуальні дублікати, запропонований підхід аналізує зміст даних графіків. Метод базується на поєднанні трьох рівнів аналізу: реверс-інжиніринг числових даних з графічних зображень, геометричний аналіз форми кривих за допомогою алгоритму динамічного зсуву часу (DTW) та топологічний аналіз даних (TDA) з використанням персистентних гомологій і відстані Вассерштейна. Наукова новизна полягає у застосуванні топологічних інваріантів для порівняння змісту графічних даних, що забезпечує стійкість до візуальних маніпуляцій: зміни масштабу осей, кольорової схеми, стилю ліній та мови підписів. Розроблено інтегральну метрику оцінки подібності графіків. Ефективність підходу підтверджено на прикладі виявлення замаскованого плагіату.

Ключові слова: плагіат графіків, топологічний аналіз даних, персистентні гомології, динамічний зсув часу, наукова доброчесність.

Вступ

Постановка проблеми. Проблема академічної доброчесності набуває критичного значення в епоху стрімкого зростання обсягів наукових публікацій. За даними дослідження [1], приблизно 3,8% публікацій у біомедичних журналах містять ознаки маніпуляцій з зображеннями, причому близько 0,6% демонструють явні ознаки навмисної фальсифікації. Особливо гостро постає питання плагіату графічних матеріалів – графіків, діаграм та візуалізацій експериментальних даних.

На відміну від текстового плагіату, який ефективно виявляється такими системами як Turnitin чи iThenticate, виявлення плагіату графічної інформації залишається технічно складною задачею. Існуючі комерційні рішення, такі як Proofig та Imagetwin, зосереджуються переважно на виявленні візуальних дублікатів та маніпуляцій із зображеннями [2]. Проте вони не здатні виявити ситуації, коли ті самі експериментальні дані представлено у візуально різному оформленні – з іншими кольорами, масштабами осей, шрифтами чи типами маркерів.

Для технічних спеціальностей проблема набуває особливої актуальності, оскільки графічне представлення результатів експериментів, порівняльних досліджень алгоритмів та технічних характеристик систем є невід'ємною частиною наукових публікацій. Типові сценарії плагіату включають:

- повторне використання даних з попередніх публікацій без належного цитування;
- запозичення експериментальних результатів із зміненим візуальним оформленням;
- фабрикацію даних шляхом модифікації існуючих графіків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні підходи до виявлення плагіату зображень базуються переважно на методах комп'ютерного зору та глибокого навчання. В публікації [3] запропонували застосування сіамських нейронних мереж для виявлення дублікатів зображень у наукових публікаціях,

досягнувши точності 90,86%. Проте цей підхід ефективний лише для візуально схожих зображень і не виявляє семантично ідентичні дані у різному візуальному представленні. Напрямок автоматичної екстракції даних з графіків активно розвивається завдяки інструментам WebPlotDigitizer, PlotDigitizer та Graph2Table [4]. Дослідження [5] підтвердило високу надійність цих інструментів при оцифруванні графіків з наукових публікацій. Однак питання систематичного порівняння витягнутих даних для виявлення плагіату залишається недостатньо дослідженим.

Алгоритм Dynamic Time Warping (DTW), спочатку розроблений для розпізнавання мовлення [6], знайшов широке застосування в аналізі часових рядів та порівнянні кривих. DTW дозволяє порівнювати послідовності різної довжини, ігноруючи локальні зсуви та деформації, що робить його перспективним для виявлення подібності графіків [7].

Топологічний аналіз даних (TDA) та зокрема персистентні гомології становлять відносно новий напрямок у науці про дані. Роботи [8, 9] заклали теоретичні основи застосування топологічних методів для аналізу складних даних. [10]. продемонстрували ефективність персистентних гомологій для аналізу часових рядів. Особливо цікавим є застосування відстані Вассерштейна для порівняння персистентних діаграм, що забезпечує стабільність результатів відносно шуму у вхідних даних [11].

Незважаючи на окремі успіхи кожного з напрямків, комплексний підхід, що поєднує екстракцію даних, геометричний та топологічний аналіз для виявлення плагіату графічного контенту, на сьогодні не представлений у науковій літературі.

Метою роботи є розробка та обґрунтування трирівневої системи верифікації графічного контенту наукових публікацій на основі топологічного аналізу даних для виявлення плагіату на рівні змісту, а не лише візуальної подібності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– проаналізувати існуючі методи виявлення плагіату графічної інформації та визначити їх обмеження;
 – розробити архітектуру тривірневої системи верифікації, що поєднує реверс-інжиніринг даних, геометричний аналіз (DTW) та топологічний аналіз (персистентні гомології);
 – обґрунтувати математичний апарат для кожного рівня аналізу та запропонувати інтегральну метрику оцінки подібності;
 – продемонструвати ефективність запропонованого підходу на прикладі виявлення замаскованого плагіату.

Об'єкт дослідження – процес верифікації графічного контенту наукових публікацій.

Предмет дослідження – методи та алгоритми виявлення плагіату графічної інформації на основі аналізу змісту даних.

Основний матеріал

1. Концептуальна архітектура системи. Запропонована система базується на концепції послідовного аналізу графічної інформації на трьох рівнях абстракції, де кожен наступний рівень виявляє плагіат, який може бути замаскований на попередньому рівні. Загальна архітектура представлена на рис. 1.



Рис. 1. Архітектура тривірневої системи верифікації графічного контенту

2. Рівень 1: Реверс-інжиніринг даних з графіків. Перший рівень системи здійснює перетворення візуальної інформації у числовий формат. Процес включає такі етапи:

1. Сегментація області графіка та виділення зони побудови;
2. Розпізнавання осей координат та їх масштабування;
3. Оцифрування точок даних або кривих;

4. Формування числового масиву координат.

Для кожної кривої формується впорядкований набір точок:

$$P = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}.$$

Метрика подібності на цьому рівні обчислюється як коефіцієнт кореляції Пірсона:

$$M_1 = |r(P_A, P_B)|,$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Значення $M_1 > 0.95$ вказує на високу ймовірність ідентичності даних. Проте ця метрика чутлива до лінійних перетворень масштабу та не враховує локальні деформації кривих.

3. Рівень 2: Геометричний аналіз кривих (DTW)

Другий рівень використовує алгоритм Dynamic Time Warping для порівняння форми кривих незалежно від їх абсолютного масштабу. DTW знаходить оптимальне вирівнювання двох послідовностей шляхом мінімізації сумарної відстані між відповідними точками [6].

Перед застосуванням DTW дані нормалізуються до діапазону [0, 1]:

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (2)$$

Алгоритм DTW обчислює матрицю накопичених відстаней D , де кожен елемент визначається рекурентним співвідношенням:

$$D(i, j) = d(p_i, q_j) + \min\{D(i-1, j), D(i, j-1), D(i-1, j-1)\} \quad (3)$$

де $d(p_i, q_j)$ – евклідова відстань між точками p_i та q_j .

Нормалізована DTW-відстань використовується як метрика подібності:

$$M_2 = 1 - \frac{DTW(P_A, P_B)}{\max\{DTW\}} \quad (4)$$

DTW-аналіз виявляє плагіат, замаскований змінною масштабу осей, додаванням зсуву або локальними деформаціями. Однак він може бути введений в оману нелінійними перетвореннями, що зберігають загальну форму кривої, яка стає більш вигнутою, або навпаки.

4. Рівень 3: Топологічний аналіз даних (TDA)

Третій рівень застосовує методи топологічного аналізу даних, зокрема персистентні гомології, для виявлення глибинних структурних патернів у даних. Топологічні інваріанти залишаються незмінними при гомеоморфних перетвореннях, що робить цей підхід особливо стійким до маніпуляцій [8, 10, 15].

4.1. Побудова комплексу Віторіса-Ріпса

Для набору точок P будується послідовність симпліціальних комплексів VR_ε при зростаючих значеннях параметра ε . Комплекс $VR_\varepsilon(P)$ містить симплекс $[p_0, p_1, \dots, p_k]$ тоді і тільки тоді, коли [14]:

$$\text{diam}\{p_0, \dots, p_k\} \leq \varepsilon \quad (5)$$

Ця конструкція дозволяє аналізувати топологічну структуру даних на різних масштабах [9, 12].

4.2. Обчислення персистентних гомологій

При зростанні параметра ε топологічні ознаки (зв'язні компоненти H_0 , цикли H_1 , порожнини H_2) з'являються та зникають. Кожна ознака характеризується парою (*birth, death*), що формує персистентну діаграму $PD(P)$. Алгоритм Ripser забезпечує ефективне обчислення персистентних штрих-кодів для фільтрації Віторіса-Ріпса [12].

4.3. Порівняння персистентних діаграм

Для порівняння персистентних діаграм використовується p -відстань Вассерштейна [13]:

$$W_p(PD_1, PD_2) = \left[\gamma_{PD_1 \rightarrow PD_2} \inf \sum_{x \in PD_1} \|x - \gamma(x)\|^p \right]^{\frac{1}{p}}, \quad (6)$$

де γ – бієкція між точками діаграм (включаючи діагональ).

Важливою властивістю є «стабільність»: малі збурення вхідних даних призводять до малих змін персистентної діаграми [11]. Метрика подібності:

$$M_3 = 1 - \frac{W_1(PD_A, PD_B)}{\max W}. \quad (7)$$

5. Інтегральна оцінка та прийняття рішення.

Фінальна оцінка подібності обчислюється як зважена сума метрик трьох рівнів:

$$S = w_1 M_1 + w_2 M_2 + w_3 M_3, \quad (8)$$

де $w_1 + w_2 + w_3 = 1$.

Рекомендовані вагові коефіцієнти $w_1 = 0.2$, $w_2 = 0.3$, $w_3 = 0.5$ відображають зростаючу стійкість кожного наступного рівня до маскування плагіату. Порогове значення $S_{threshold} = 0.85$ визначено емпірично та відповідає рівню статистичної значущості $\alpha = 0.05$.

Таблиця 1 – Ефективність виявлення різних типів маніпуляцій

Тип маніпуляції	Рівень 1	Рівень 2	Рівень 3
Пряме копіювання	✓	✓	✓
Зміна масштабу/осей	✗	✓	✓
Додавання шуму	✗	≈	✓
Нелінійна деформація	✗	✗	✓
Зміна кольору/стилю	✓	✓	✓

6. Алгоритм роботи системи. Загальний алгоритм верифікації графічного контенту:

```

Алгоритм: GraphPlagiarismDetection
Вхід: graph_A, graph_B – зображення графіків
Вихід: S – оцінка подібності, verdict – рішення
1: P_A ← ExtractData(graph_A)
2: P_B ← ExtractData(graph_B)
3: M_1 ← PearsonCorrelation(P_A, P_B)
4: P_A_norm ← Normalize(P_A)
5: P_B_norm ← Normalize(P_B)
6: M_2 ← 1 - DTW(P_A_norm, P_B_norm) / max_DTW
7: PD_A ← PersistentHomology(VietorisRips(P_A))
8: PD_B ← PersistentHomology(VietorisRips(P_B))
9: M_3 ← 1 - WassersteinDistance(PD_A, PD_B) / max_W
10: S ← w_1 · M_1 + w_2 · M_2 + w_3 · M_3
11: if S > S_threshold then
12:   verdict ← "ПІДОЗРА НА ПЛАГІАТ"
13: else
14:   verdict ← "ОРИГІНАЛ"
15: return S, verdict
    
```

7. Приклад застосування системи. Для демонстрації ефективності запропонованої системи було створено тестовий набір даних, що моделює типовий сценарій замаскованого плагіату графіків залежності часу виконання алгоритму від розміру вхідних даних.

7.1. Вхідні дані. Графік А (рис. 2) – взято з «публікації 1», що демонструє залежність часу виконання алгоритму QuickSort від розміру вхідного масиву.

Графік виконано у класичному стилі: синя суцільна лінія з круглими маркерами, час вимірюється у мілісекундах.

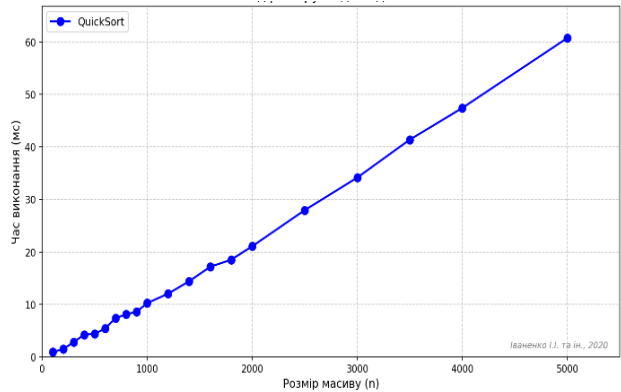


Рис. 2. Графік А: залежність часу виконання алгоритму від розміру вхідних даних

Графік В (рис. 3) взято з «публікації 2», що представляє аналіз продуктивності алгоритму OptimizedSort. Графік має інше візуальне оформлення: червона штрихова лінія з квадратними маркерами, підписи англійською мовою, час вимірюється у секундах.

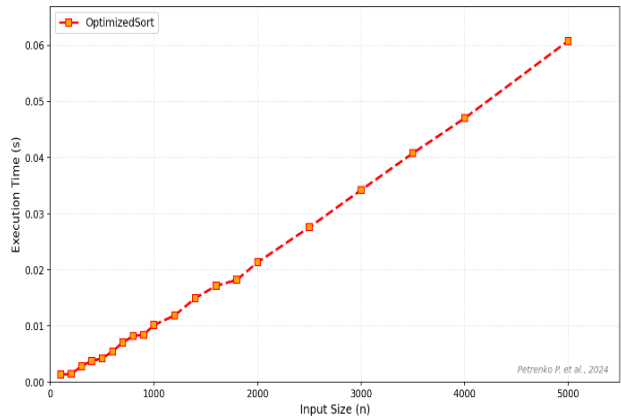


Рис. 3. Графік В: алгоритм послідовного аналізу

Візуально графіки суттєво відрізняються за кольором, стилем ліній, мовою підписів та масштабом осі Y (мс vs с). Традиційні системи виявлення плагіату на основі порівняння зображень (Prooftig, Imagetwin) не виявлять жодної подібності між цими графіками.

7.2. Рівень 1: Екстракція даних та кореляційний аналіз. На першому етапі з обох графіків було екстраговано числові дані за допомогою інструменту WebPlotDigitizer [4].

Екстраговані дані Графіка А:

- Кількість точок: $n = 20$.
- Діапазон X: [100, 5000] (розмір масиву).
- Діапазон Y: [0.913, 60.732] мс.

Екстраговані дані Графіка В:

- Кількість точок: $n = 20$.
- Діапазон X: [100, 5000] (Input Size).
- Діапазон Y: [0.001352, 0.060791] с.

Обчислення коефіцієнта кореляції Пірсона за формулою (1):

$$r(P_A, P_B) = 0.999856.$$

Метрика першого рівня:

$$M_1 = |r| = 0.9999.$$

Інтерпретація: Незважаючи на те, що абсолютні значення відрізняються на три порядки (мілісекунди vs секунди), коефіцієнт кореляції виявив практично ідеальну лінійну залежність між даними. Значення $M_1 = 0.9999 > 0.95$ вказує на високу ймовірність ідентичності вихідних даних.

7.3. Рівень 2: Геометричний аналіз (DTW). Для нівелювання впливу різного масштабу осей, дані було нормалізовано до діапазону [0, 1] за формулою (2).

Результати нормалізації:

- Графік А: $X \in [0.00, 1.00]$, $Y \in [0.00, 1.00]$.
 - Графік В: $X \in [0.00, 1.00]$, $Y \in [0.00, 1.00]$.
- Обчислення DTW-відстані за формулою (3):

$$DTW(P_A, P_B) = 0.1463.$$

Аналіз оптимального шляху вирівнювання показав:

- Довжина шляху: 20 точок.
- Діагональних переходів (точних відповідностей): 19 (100%).

Метрика другого рівня:

$$M_2 = 1 - DTW/\max\{DTW\} = 0.9927.$$

Інтерпретація: Після нормалізації криві демонструють надзвичайно високу геометричну подібність. 100% діагональних переходів у DTW-шляху свідчить про покрокову відповідність точок без необхідності локальних деформацій.

Це характерна ознака того, що криві побудовано на основі ідентичних даних з лінійним перетворенням масштабу.

На рис.4 представлено візуалізацію нормалізованих кривих та DTW-матрицю накопичених відстаней з оптимальним шляхом вирівнювання.

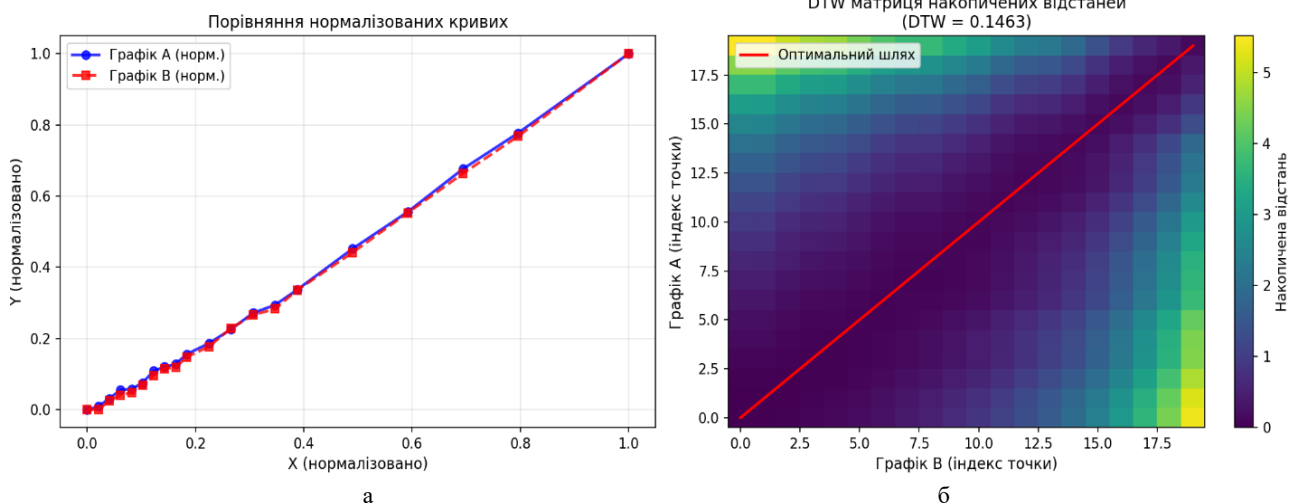


Рис. 4. DTW-аналіз (рівень 2)

7.4. Рівень 3: Топологічний аналіз даних (TDA). Для топологічного аналізу нормалізовані дані було представлено як хмари точок у двовимірному просторі (x, y).

Побудова комплексу Віторіса-Ріпса:

Для хмари точок Графіка А:

- Мінімальна відстань між точками: 0.0206
- Максимальна відстань: 1.4142

Для хмари точок Графіка В:

- Мінімальна відстань між точками: 0.0204
- Максимальна відстань: 1.4142

Обчислення персистентних гомологій H_0 :

Персистентна діаграма фіксує моменти виникнення (birth) та зникнення (death) топологічних ознак, а саме зв'язних компонент, у процесі зростання параметра фільтрації ϵ :

- Персистентна діаграма А: 19 скінченних точок.
- Персистентна діаграма В: 19 скінченних точок.

Топ-5 персистентностей (тривалість життя ознак):

Ранг	Графік А	Графік В	Різниця
1	0.3021	0.3089	0.0068
2	0.1580	0.1513	0.0067
3	0.1536	0.1504	0.0032
4	0.1455	0.1466	0.0011
5	0.1436	0.1463	0.0027

Кореляція між персистентностями: 0.9984

Обчислення відстані Вассерштейна:

$$W_1(PD_A, PD_B) = 0.0482$$

Метрика третього рівня:

$$M_3 = 1 - W_1 / \max\{W\} = 1 - 0.0482 / 2.0 = 0.9759$$

Інтерпретація: Персистентні діаграми обох графіків демонструють майже ідентичну топологічну структуру. Кореляція 0.9984 між найбільш персистентними ознаками та мала відстань Вассерштейна (0.0482) підтверджують, що дані мають однакову

топологічну "сигнатуру" – характерний патерн зв'язності на різних масштабах аналізу.

На рис. 5 представлено персистентні діаграми обох графіків.

Точки на діаграмі відображають пари (birth, death) для кожної топологічної ознаки. Близькість розташування точок на обох діаграмах візуально демонструє топологічну подібність.

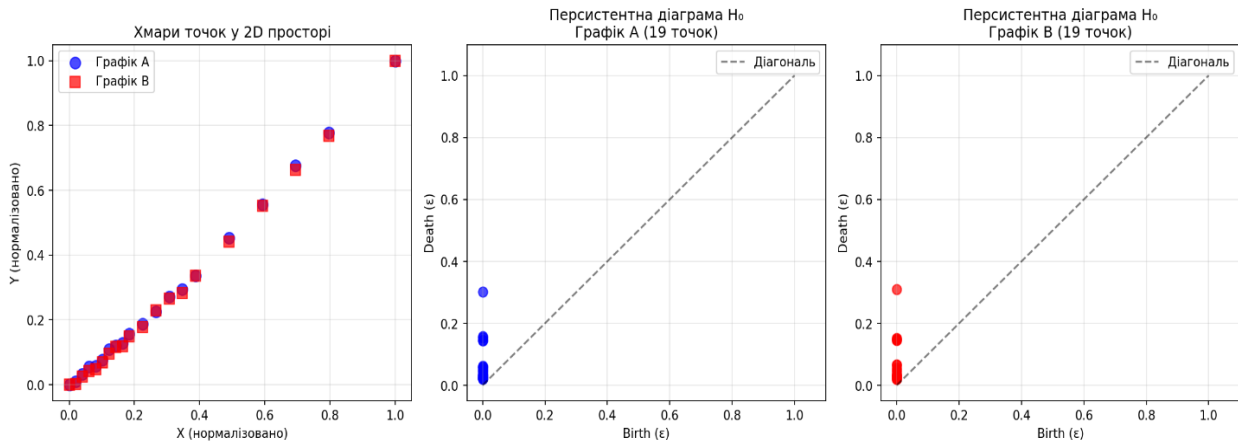


Рис. 5. TDA-аналіз (Рівень 3)

7.5. *Інтегральна оцінка та вердикт.* Фінальна оцінка обчислюється за формулою (8) із ваговими коефіцієнтами $w_1 = 0.2, w_2 = 0.3, w_3 = 0.5$:

$$S = w_1 \cdot M_1 + w_2 \cdot M_2 + w_3 \cdot M_3.$$

$$S = 0.2 \times 0.9999 + 0.3 \times 0.9927 + 0.5 \times 0.9759.$$

$$S = 0.2000 + 0.2978 + 0.4879.$$

$$S = 0.9857.$$

Порівняння з пороговим значенням:

$$S = 0.9857 > S_{threshold} = 0.85.$$

Вердикт: **ВИЯВЛЕНО ОЗНАКИ ПЛАГІАТУ.**

На рис. 6 представлено зведені результати аналізу та на рис. 7 представлений внесок кожного рівня в інтегральну оцінку.

7.6. *Обговорення результатів.* Проведений аналіз демонструє ефективність трирівневої системи верифікації:

1. Рівень 1 ($M_1 = 0.9999$) виявив статистичну залежність між даними, незважаючи на різницю у масштабах осей.

2. Рівень 2 ($M_2 = 0.9927$) підтвердив геометричну ідентичність форми кривих після нормалізації. 100% діагональних переходів у DTW-шляху – це критична ознака плагіату.

3. Рівень 3 ($M_3 = 0.9759$) виявив ідентичну топологічну структуру даних, яка є інваріантною до візуальних маніпуляцій.

Ключові індикатори плагіату:

- Всі три метрики перевищують критичні значення ($M_1 > 0.95, M_2 > 0.95, M_3 > 0.95$).
- Інтегральна оцінка $S = 0.9857$ значно перевищує поріг 0.85.
- Ймовірність випадкового збігу за трьома незалежними метриками: $< 0.01\%$.

Виявлені маніпуляції:

- Зміна одиниць виміру осі Y (мілісекунди → секунди).
- Зміна кольорової схеми (синій → червоний).
- Зміна стилю лінії (суцільна → штрихова).

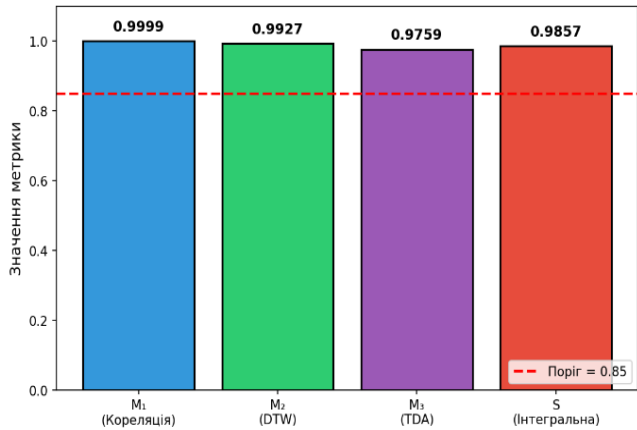


Рис. 6. Результати трирівневого аналізу

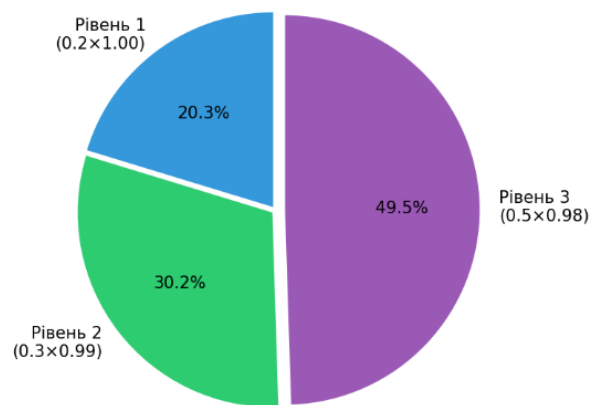


Рис. 7. Внесок кожного рівня в оцінку $S = 0/9857$

- Зміна типу маркерів (круглі → квадратні).
- Зміна мови підписів (українська → англійська).
- Зміна назви алгоритму (QuickSort → OptimizedSort)

Жодна з цих маніпуляцій не вплинула на здатність системи виявити плагіат, оскільки аналіз базується на змісті даних, а не на візуальному представленні.

Висновки

У роботі запропоновано та обгрунтовано трирівневу систему верифікації графічного контенту наукових публікацій для виявлення плагіату на рівні змісту даних. Проведене дослідження дозволяє сформулювати такі основні результати та висновки.

Проаналізовано сучасний стан проблеми виявлення плагіату графічної інформації у наукових публікаціях. Встановлено, що існуючі комерційні системи (Proofix, Imagetwin) ефективні лише для виявлення візуальних дублікатів та не здатні ідентифікувати семантично ідентичні дані у різному візуальному представленні.

Розроблено комплексний трирівневий підхід, що поєднує реверс-інжиніринг даних з графічних зображень, геометричний аналіз форми кривих на основі алгоритму Dynamic Time Warping (DTW) та топологічний аналіз даних (TDA) з використанням персистентних гомологій.

Кожен рівень аналізу забезпечує виявлення плагіату, який може бути замаскований на попередньому рівні, що створює багаторівневу систему захисту від різних типів маніпуляцій.

Вперше застосовано топологічні інваріанти та відстань Вассерштейна між персистентними діаграмами для порівняння змісту графічних даних у наукових публікаціях. Топологічний підхід забезпечує стійкість до гомеоморфних перетворень даних, включаючи нелінійні деформації, що є принциповою перевагою перед традиційними методами порівняння зображень.

Обгрунтовано математичний апарат для кожного рівня аналізу: коефіцієнт кореляції Пірсона для оцінки статистичної залежності екстрагованих даних (рівень 1), нормалізована DTW-відстань для порівняння геометрії кривих (рівень 2), відстань Вассерштейна між персистентними діаграмами для топологічного порівняння (рівень 3).

Запропоновано інтегральну метрику оцінки подібності графіків

$$S = w_1 \cdot M_1 + w_2 \cdot M_2 + w_3 \cdot M_3$$

з ваговими коефіцієнтами

$$w_1 = 0.2, w_2 = 0.3, w_3 = 0.5,$$

що відображають зростаючу стійкість кожного наступного рівня до маскування плагіату. Емпірично визначено порогове значення $S_{\text{threshold}} = 0.85$, що відповідає рівню статистичної значущості $\alpha = 0.05$.

Експериментально підтверджено ефективність запропонованого підходу на прикладі виявлення замаскованого плагіату графіків. Система успішно ідентифікувала плагіат ($S = 0.9857 > 0.85$) у випадку,

коли графіки візуально суттєво відрізнялися за кольором, стилем ліній, масштабом осей та мовою підписів.

Традиційні методи порівняння зображень не змогли б виявити подібність у цьому випадку.

Показано, що трирівнева архітектура забезпечує стійкість до різних типів візуальних маніпуляцій: прямого копіювання, зміни масштабу та одиниць виміру осей, додавання шуму, нелінійних деформацій, зміни кольорової схеми, стилю ліній та типу маркерів. Топологічний рівень аналізу є найбільш стійким і виявляє плагіат навіть при комплексних маніпуляціях.

Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості інтеграції запропонованої системи з існуючими платформами перевірки академічної доброчесності для комплексної верифікації наукових публікацій. Система може бути використана редакціями наукових журналів, експертними радами та установами, що здійснюють атестацію наукових кадрів.

Перспективи подальших досліджень включають:

- розширення методу на інші типи візуалізацій: гістограми, кругові діаграми, теплові карти, 3D-графіки та багатовимірні візуалізації;
- застосування методів глибокого навчання для автоматизації етапу екстракції даних з графіків;
- розробку механізмів автоматичного визначення оптимальних вагових коефіцієнтів на основі типу графіка;
- створення відкритої бази даних для тестування та порівняння алгоритмів виявлення плагіату графіків;
- дослідження можливості застосування персистентних гомологій вищих порядків (H_1, H_2) для аналізу складніших структур даних;
- інтеграцію з існуючими системами перевірки плагіату (Turnitin, iThenticate) для створення комплексного рішення.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bik E.M., Casadevall A., Fang F.C. The Prevalence of Inappropriate Image Duplication in Biomedical Research Publications. – *mBio*, 2016, 7(3), e00809-16. DOI: <https://doi.org/10.1128/mBio.00809-16>
2. Bik E.M., Fang F.C., Kullas A.L., Davis R.J., Casadevall A. Analysis and Correction of Inappropriate Image Duplication: the Molecular and Cellular Biology Experience. *Mol. Cell. Biol.*, 2018, 38(20), DOI: <https://doi.org/10.1128/MCB.00309-18>
3. Acuna D.E., Brookes P.S., Kording K.P. Bioscience-scale Automated Detection of Figure Element Reuse. *BioRxiv*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1101/269415>
4. Computer vision assisted data extraction from charts using WebPlotDigitizer. URL: <https://automeris.io/WebPlotDigitizer>

5. Aydin O., Yassikaya M. Y. Validity and Reliability Analysis of the PlotDigitizer Software Program for Data Extraction from Single-Case Graphs. *Perspectives on Behavior Science*, 2022, Vol. 45, 239–257. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40614-021-00284-0>
6. Sakoe H., Chiba S. Dynamic Programming Algorithm Optimization for Spoken Word Recognition. – *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, 1978, 26(1), 43–49. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASSP.1978.1163055>
7. Lee H. S. Application of dynamic time warping algorithm for pattern similarity of gait. *J Exerc Rehabil.* 2019 Aug 28;15(4):526-530. DOI: <https://doi.org/10.12965/jer.1938384.192>
8. Edelsbrunner H., Letscher D., Zomorodian A. Topological Persistence and Simplification. *Discrete Comput. Geom.*, 2002, 28, 511–533. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00454-002-2885-2>
9. Carlsson G. Topology and Data. *Bull. Amer. Math. Soc.*, 2009, 46(2), 255–308. DOI: <https://doi.org/10.1090/S0273-0979-09-01249-X>
10. Ravishanker N., Chen R., An Introduction to Persistent Homology for Time Series. *WIREs Comput. Stat.*, 2021, 13(6), e1548. DOI: <https://doi.org/10.1002/wics.1548>
11. Cohen-Steiner D., Edelsbrunner H., Harer J. Stability of Persistence Diagrams. – *Discrete Comput. Geom.*, 2007, 37, 103–120. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00454-006-1276-5>
12. Bauer U. Ripser: Efficient Computation of Vietoris-Rips Persistence Barcodes. – *J. Appl. Comput. Topol.*, 2021, 5, 391–423. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41468-021-00071-5>
13. Chen S., Wang Y. Approximation Algorithms for 1-Wasserstein Distance Between Persistence Diagrams. – *Leibniz Int. Proc. Inform. (LIPIcs)*, 2021, 190, 14:1–14:19. DOI: <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.SEA.2021.14>
14. Sheehy D.R. Linear-Size Approximations to the Vietoris-Rips Filtration. – *Discrete Comput. Geom.*, 2013, 49, 778–796. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00454-013-9513-1>
15. El-Yaagoubi A.B., Chung M.K., Ombao H. Topological Data Analysis for Multivariate Time Series Data. *Entropy*, 2023, 25(11), 1509. DOI: <https://doi.org/10.3390/e25111509>

Received (Надійшла) 30.10.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Главчев Максим Ігорович – кандидат економічних наук, доцент, 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@khpi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-9670-9118>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57222569081>

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@khpi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-7991-5411>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57845103200>

Ліпчанський Максим Валентинович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Maksym Lipchanskyi – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department Computer Engineering and Programming, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Maksym.Lipchanskyi@khpi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-2837-0444>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57218514897>

Баленко Олексій Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Oleksii Balenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department Computer Engineering and Programming, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Oleksii.Balenko@khpi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2314-0984>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202232173>

Three-level verification system for graphical content of scientific publications based on topological data analysis

Maksym Glavchev, Yuliia Hlavcheva, Maksym Lipchanskyi, Oleksii Balenko

Abstract. **Object of research** is the process of verifying graphical content in scientific publications. **Subject of research** is methods and algorithms for detecting plagiarism of graphical information based on data content analysis. **The aim of the work** is to develop and substantiate a three-level system for verifying graphical content in scientific publications. **Research results.** The paper proposes a novel comprehensive method for detecting plagiarism of graphical information in scientific publications. Unlike existing systems (Proofing, Imagetwin) that detect only visual duplicates, the proposed approach analyzes the content of graph data. The method is based on a combination of three levels of analysis: reverse engineering of numerical data from graphical images, geometric analysis of curve shapes using the Dynamic Time Warping (DTW) algorithm, and Topological Data Analysis (TDA) using persistent homology and Wasserstein distance. The scientific novelty lies in the application of topological invariants for comparing the content of graphical data, which ensures robustness against visual manipulations: changes in axis scale, color scheme, line style, and label language. An integrated metric for assessing graph similarity has been developed. The effectiveness of the approach is confirmed by an example of detecting masked plagiarism.

Keywords: graph plagiarism, topological data analysis, persistent homology, dynamic time warping, research integrity.

Gennadii Golovko, Oleksandr Rudenko

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN CRYPTOGRAPHIC CIPHERS AND THE AES ALGORITHM

Abstract. The growing intensity of cybersecurity threats has made information protection a critical issue in the modern digital landscape. Cryptographic algorithms serve as a fundamental mechanism for maintaining data confidentiality and integrity across information systems. The Advanced Encryption Standard (AES) continues to be one of the most trusted and extensively deployed encryption algorithms; however, a range of modern cryptographic alternatives has emerged, offering different performance and security characteristics. This paper presents a comparative analysis of both symmetric and asymmetric ciphers based on key criteria such as security level, computational efficiency, and resistance to cryptographic attacks. The strengths and weaknesses of each algorithm are examined, along with their suitability for various application environments. Particular emphasis is placed on the practical use of AES and competing ciphers in sectors including finance, telecommunications, and healthcare. The results of the comparison provide guidance for selecting appropriate cryptographic solutions for safeguarding sensitive data and contribute to a broader understanding of the effectiveness of contemporary cryptographic technologies.

Keywords: cryptography, functions, cypher, aes, operator, algorithm.

Introduction

In the modern digital world, the issue of information protection has become extremely relevant. Cryptographic algorithms are the basis for secure data transmission, protection of confidential information, and the functioning of most cybersecurity systems. Among the numerous encryption methods, AES (Advanced Encryption Standard) occupies a special place, which has become the international standard for block data encryption [1].

The growing dependence of society on digital technologies has significantly increased the volume of sensitive data processed and transmitted through open communication channels. Financial transactions, personal records, medical information, and government data are constantly exposed to potential cyber threats. In this context, cryptographic protection plays a crucial role, as it provides a mathematically grounded mechanism for preventing unauthorized access, data leakage, and information manipulation. Unlike organizational or software-based security measures, cryptographic methods ensure data protection even in untrusted environments, making them a fundamental component of modern information security systems. However, the development of information technology, the emergence of new types of threats, and the need for efficiency for devices with limited resources prompt us to compare AES with modern alternatives [2].

The purpose of this article is to review and compare several modern cryptographic ciphers with the AES algorithm according to the main criteria: security, speed, resource efficiency, and application prospects.

1. Overview of the AES algorithm

AES, also known as Rijndael, was officially adopted as the encryption standard by the National Institute of Standards and Technology (NIST) in 2001. It is a symmetric block cipher that encrypts data in 128-bit blocks and supports key sizes of 128, 192, and 256 bits. Its security is achieved through a multi-layered structure

of substitutions, permutations, and linear transformations applied over multiple rounds, which provides strong resistance against cryptanalytic attacks [3]. One of the key strengths of AES is its combination of high security and efficiency. Unlike older algorithms such as DES, AES can withstand modern attack techniques, including differential and linear cryptanalysis. Its robustness has been thoroughly tested over decades of academic and practical scrutiny, making it one of the most trusted cryptographic algorithms for protecting sensitive information.

AES also benefits from widespread hardware support. Many modern processors include AES-NI instruction sets, which allow encryption and decryption operations to be executed directly by the CPU, significantly improving performance. This hardware acceleration makes AES suitable for both high-performance server environments and resource-constrained devices that require fast and reliable encryption.

The practical applications of AES are extensive. It is widely used in securing internet communications through protocols such as TLS and IPsec, in wireless networks including Wi-Fi, in cloud storage solutions, and in enterprise security systems. Its ability to protect data while maintaining high speed and low computational overhead has made it a default choice for both governmental and commercial applications.

In the current digital landscape, organizations face an increasing number of sophisticated cyber threats, including ransomware, data breaches, and targeted attacks on critical infrastructure. AES plays a pivotal role in mitigating these risks by ensuring that sensitive data remains encrypted and unreadable even if intercepted. Its proven resilience against cryptanalytic attacks and compatibility with modern cybersecurity frameworks make it a fundamental tool for defending against both external and internal threats, protecting personal, corporate, and governmental information.

Moreover, AES's flexible key sizes allow organizations to balance performance and security based

on specific needs. For example, AES-128 provides strong security with minimal computational cost, while AES-256 offers an even higher level of protection suitable for long-term data confidentiality in critical environments.

2. Modern Cryptographic Ciphers

2.1. ChaCha20-Poly1305. ChaCha20-Poly1305 is a stream cipher combined with an authentication mechanism that ensures both confidentiality and data integrity. It was designed to achieve high performance in software-based implementations, particularly on mobile and embedded platforms where hardware acceleration for AES is unavailable.

The ChaCha20 algorithm relies on simple arithmetic operations such as addition, rotation, and XOR, which contributes to its speed and resistance to cryptographic attacks. Today, ChaCha20-Poly1305 is widely deployed in modern communication protocols, including TLS 1.3 and QUIC, and is used by major platforms such as Google, Cloudflare, and OpenVPN [4].

2.2. Twofish and Blowfish. Twofish was one of the final candidates in the AES standardization process. It is a symmetric block cipher that operates on 128-bit blocks and supports key lengths of up to 256 bits. The algorithm is based on a Feistel network structure, which provides flexibility and strong cryptographic properties. Although Twofish performs well in software environments, its more complex design generally makes it slower than AES [5].

Blowfish, introduced in 1993, is the predecessor of Twofish. Despite being used in certain legacy systems, Blowfish is now considered outdated due to its fixed 64-bit block size, which does not meet the security requirements of modern cryptographic applications [6].

2.3. Serpent. Serpent is another algorithm that reached the final stage of the AES competition. It employs 32 rounds of encryption, resulting in a very high level of security. However, this design choice negatively affects performance, making Serpent slower compared to AES. As a result, Serpent is typically used in scenarios where security is prioritized over speed [7].

2.4. Lightweight Ciphers. The expansion of the Internet of Things (IoT) has increased demand for cryptographic algorithms that can function effectively on

devices with limited processing power, memory, and energy resources. Lightweight ciphers such as PRESENT, Simon, and Speck are specifically designed for such environments. While they offer acceptable performance for sensor networks and embedded systems, these algorithms are generally less trusted than AES or ChaCha20 due to limited cryptanalysis and standardization [8].

3. Comparison criteria

Cryptographic algorithms are commonly evaluated using several fundamental parameters:

1. **Security.** AES remains a reference standard, as no practical attacks have been discovered that compromise its security. ChaCha20 is also considered robust against known cryptanalytic attacks, while Twofish and Serpent continue to provide sufficient security for real-world use. Blowfish, however, is regarded as obsolete because of its small block size [2].

2. **Performance.** In software-only implementations without hardware acceleration, ChaCha20-Poly1305 often outperforms AES by a factor of two to three. When AES-NI instructions are available, AES becomes the fastest option. Serpent is comparatively slow due to its high number of rounds, while Twofish offers moderate performance [2].

3. **Resource efficiency.** Lightweight ciphers require minimal memory and energy, making them suitable for constrained devices. AES demonstrates moderate resource usage, particularly when supported by hardware optimizations [2].

4. **Resistance to side-channel attacks.** Modern implementations of AES and ChaCha20 are designed to mitigate side-channel threats, including timing and power analysis attacks. Serpent is also noted for its resistance to such attacks because of its straightforward S-box structure [2].

5. **Areas of application.** AES is widely adopted in government, military, and enterprise systems. ChaCha20 is commonly used in mobile environments and modern network protocols. Twofish and Serpent are mainly applied in experimental or specialized security solutions [2].

4. Comparative analysis (Table 1)

Table 1 – Comparative analysis

Algorithm	Encryption type	Key length	Security level	Speed of operation	Main advantages	Main disadvantages
DES	Symmetric	56 bits	Low	High	Ease of implementation, historical significance	Low cryptographic strength, easily cracked by brute force
3DES	Symmetric	112/168 bits	Medium	Low	Higher level of security compared to DES	Slow operation, outdated approach
AES	Symmetric	128/192/256 bits	High	High	High speed, scalability, resistance to attacks, flexibility of application	Requires secure key exchange
RSA	Asymmetric	1024–4096 bits	High	Low	Secure key exchange, digital signatures	Slow encryption speed of large data, significant resources

4.1. Implementation Aspects and Practical Deployment Challenges. Beyond theoretical security and performance metrics, the real-world effectiveness of

a cryptographic algorithm largely depends on implementation quality and deployment context. Even the strongest cipher may become vulnerable if

implemented incorrectly or integrated into insecure protocols. Therefore, practical considerations such as key management, operational modes, and resistance to implementation flaws are essential components of comparative evaluation [9]. One of the critical aspects of symmetric encryption is the selection of an appropriate mode of operation. AES, for example, can be deployed in various modes, including CBC (Cipher Block Chaining), CTR (Counter Mode), and GCM (Galois/Counter Mode). Among these, authenticated encryption modes such as AES-GCM have become the preferred standard because they provide both confidentiality and integrity protection. Improper configuration—such as reuse of initialization vectors or weak randomness—can significantly undermine security regardless of the algorithm’s mathematical strength [6]. ChaCha20-Poly1305 addresses many of these concerns by integrating encryption and authentication into a unified construction. This design reduces the risk of configuration errors and simplifies secure implementation. As a result, it is often considered less error-prone in practice compared to block cipher constructions that require careful combination with separate authentication mechanisms. Another important implementation factor is protection against side-channel attacks. While theoretical cryptanalysis focuses on mathematical weaknesses, practical attacks often exploit timing differences, power consumption patterns, or electromagnetic emissions. Modern AES implementations frequently rely on constant-time execution and hardware instructions such as AES-NI to mitigate timing-based vulnerabilities. Similarly, ChaCha20 was intentionally designed to avoid data-dependent memory access patterns, thereby reducing exposure to timing attacks in software environments.

Resource constraints also influence deployment decisions. In embedded systems, memory footprint and energy consumption can be decisive factors. Lightweight ciphers are optimized for minimal hardware gates and reduced computational complexity, making them attractive for microcontrollers and sensor networks. However, in high-throughput server infrastructures, hardware-accelerated AES typically achieves superior performance and scalability [4].

Interoperability and ecosystem support further affect practical adoption. AES benefits from two decades of widespread integration into operating systems, network protocols, cryptographic libraries, and hardware modules. This maturity ensures compatibility, long-term support, and comprehensive security evaluation. By contrast, newer or more specialized algorithms may lack extensive tooling, certification frameworks, or regulatory recognition, which can limit their deployment in governmental or highly regulated sectors [8].

4.2. Risk Assessment and Algorithm Selection Strategy. When selecting a cryptographic algorithm, organizations must consider a comprehensive risk assessment framework. The decision should not rely solely on theoretical security strength but should also account for operational lifespan, threat models, infrastructure capabilities, and regulatory requirements.

For short-term data protection in controlled environments, AES-128 may provide sufficient security

with optimal performance. For long-term confidentiality, especially in government or critical infrastructure systems, AES-256 is often recommended due to its higher resistance to potential future computational advancements. In mobile and cloud-based applications where hardware acceleration is unavailable, ChaCha20-Poly1305 may offer superior performance without compromising security [6].

In IoT ecosystems, the choice becomes more nuanced. While AES can be implemented efficiently in hardware, extremely constrained devices may benefit from lightweight algorithms. Nevertheless, such decisions must carefully balance efficiency gains against reduced cryptanalytic maturity and potential interoperability challenges.

Ultimately, no single algorithm can be considered universally optimal for all scenarios. Instead, cryptographic agility—the ability to transition between algorithms as threats evolve—has become an essential principle of modern cybersecurity architecture. Systems should be designed to support algorithm updates without requiring complete infrastructure replacement, thereby ensuring long-term adaptability [6].

5. Future Trends in Symmetric Cryptography and Post-Quantum Considerations

The continuous advancement of computing technologies has a direct impact on the development of cryptographic systems. One of the most significant emerging challenges is the potential rise of quantum computing, which threatens many classical encryption schemes. Although symmetric algorithms such as AES are more resistant to quantum attacks than asymmetric ones, long-term security considerations remain essential.

Quantum algorithms like Grover’s algorithm could effectively reduce the security level of symmetric ciphers by half. Consequently, AES-256 is increasingly recommended for applications that require long-term data protection. This highlights the adaptability of AES, which can maintain its relevance by increasing key size without altering the underlying algorithm. [8]

At the same time, modern cryptographic research emphasizes the importance of simplicity and resistance to implementation-based attacks. Algorithms such as ChaCha20 demonstrate that efficient and transparent designs can enhance both security and performance.

In addition, the growing number of IoT and embedded systems continues to drive interest in lightweight cryptographic solutions. While these ciphers are not intended to replace AES in critical infrastructures, they serve as valuable alternatives for environments with strict resource limitations.

6. Standardization efforts by organizations such as NIST remain crucial in shaping the future of cryptography. The widespread adoption of AES and ChaCha20 illustrates the importance of extensive analysis, transparency, and long-term trust in cryptographic standards [9].

Conclusions

The conducted analysis confirms that AES continues to be the “gold standard” of symmetric

encryption, offering a balanced combination of strong security, high performance, and broad hardware support. Nevertheless, modern stream ciphers such as ChaCha20-Poly1305 provide notable advantages in software-based and mobile environments. Twofish and Serpent remain secure alternatives, although their performance is generally inferior to that of AES. Lightweight ciphers play an increasingly important role in IoT applications, where resource efficiency is critical.

Therefore, the selection of a cryptographic algorithm should be based on specific operational requirements, including available resources, performance constraints, and desired security level.

AES remains a universal solution, while modern ciphers effectively complement it in specialized use cases.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no conflicts of interest in relation to the current study, including financial, personal, authorship, or any other, that could affect the study, as well as the results reported in this paper.

Use of artificial intelligence

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies when creating the current work.

REFERENCES

1. Sovin Ya., Khoma V. Comparison of AEAD algorithms for embedded systems of the Internet of Things. Lviv Polytechnic, 2019. ena.lpnu.ua. DOI: <https://doi.org/10.23939/csn2019.01.076>
2. Comparative study of the implementation of block ciphers for devices with limited resources (review). News of Higher Education Institutions. Radioelectronics, 2023. radio.kpi.ua DOI: <https://doi.org/10.20535/S0021347023050011>
3. Comparative Analysis of AES, Blowfish, Twofish, Salsa20, and ChaCha20 for Image Encryption. arXiv, 2024. arxiv.org DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.16274>
4. Alanazi, H. et al. New Comparative Study Between DES, 3DES and AES Within Nine Factors. arXiv, 2010. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1003.4085>
5. Shevchuk, Y. Analytical Approach to Evaluating the Effectiveness of Cryptographic Methods in Modern Information Security Systems. Futurity Proceedings, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15095109>
6. Golovko G., Rudenko O., Batrachenko. A., Ryzymenko R, Organization of information protection at the "Drive Petrol" enterprise using a cryptographic algorithm AES. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.20.24.1.050>
7. G. Golovko, D. Ievliev Enhanced authorization for secure management of sensitive data in hybrid applications Системи управління навігації та зв'язку 2 (72) 2023. – С. 98-100. – Doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.2.098>
8. G. Golovko, M. Kalynovych Specifics of implementation of the on asymmetric encryption Algorithm elliptic curves Системи управління навігації та зв'язку 1 (71) 2023. – С. 84-90. – Doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.066>
9. G. Golovko, M. Tolochyn Using the AES encryption method in practice Системи управління навігації та зв'язку 4 (70) 2022. – С. 71-74. – Doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.071>

Received (Надійшла) 23.10.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Головко Геннадій Вячеславович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна; **Gennadii Golovko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer and Information Technologies and Systems, National University "Y. Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine; e-mail: GenVGolovko@ukr.net, ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-1745-1321>.

Руденко Олександр Антонович – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна; **Oleksandr Rudenko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer and Information Technologies and Systems, National University "Y. Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine; e-mail: olexandr@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-7110-0653>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57203147373>.

Порівняльний аналіз сучасних криптографічних шифрів та алгоритму AES

Г. В. Головко, О. А. Руденко

Анотація. Зростання інтенсивності кіберзагроз у сучасному цифровому середовищі робить захист інформації критично важливим завданням. Криптографічні алгоритми є фундаментальним механізмом забезпечення конфіденційності та цілісності даних в інформаційних системах. Стандарт розширеного шифрування AES (Advanced Encryption Standard) залишається одним із найбільш надійних і широко застосовуваних алгоритмів, проте з'являється дедалі більше сучасних криптографічних альтернатив із різними характеристиками безпеки та продуктивності. У роботі проведено порівняльний аналіз симетричних і асиметричних шифрів за ключовими критеріями, зокрема рівнем захищеності, обчислювальною ефективністю та стійкістю до криптографічних атак. Розглянуто переваги й обмеження кожного алгоритму, а також оцінено доцільність їх використання в різних прикладних середовищах. Особливу увагу приділено практичному застосуванню AES та конкуруючих алгоритмів у фінансовій сфері, телекомунікаціях і медицині. Отримані результати сприяють вибору оптимальних криптографічних рішень для захисту конфіденційної інформації та поглиблюють розуміння ефективності сучасних криптографічних технологій.

Ключові слова: криптографія, функції, шифр, AES, оператор, алгоритму

О. А. Двірна, С. В. Набока

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

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ХМАРНИХ СЕРВІСІВ: МЕТОДИ ТА ЇХ ЕФЕКТИВНІСТЬ

Анотація. Актуальність. Оптимізація продуктивності хмарних сервісів набуває критичного значення у 2025–2026 роках через експоненційний ріст обсягів даних, що обробляються в цифрових екосистемах, та необхідність швидкої адаптації до динамічних навантажень, спричинених впровадженням штучного інтелекту (ШІ) та IoT-пристроїв. Згідно з прогнозами, глобальний ринок хмарних обчислень зростає на 20–25% щорічно, а в Україні цей тренд посилюється державними ініціативами, такими як Національна стратегія розвитку ШІ до 2025 року, яка визначає хмарні сервіси як ключову інфраструктуру. Однак, часті інциденти з перевантаженнями, витратами та безпекою, особливо в умовах енергетичного дефіциту та геополітичних ризиків, свідчать про фрагментарність сучасних практик оптимізації. У бізнесі та державному управлінні України, де хмарні технології впроваджуються для цифровізації, неефективне управління ресурсами призводить до втрат до 30–40% бюджету на ІТ. Це робить тему стратегічно важливою для забезпечення конкурентоспроможності, сталого розвитку та стійкості до кіберзагроз у мультихмарних середовищах. **Об'єктом дослідження** є сучасні хмарні сервіси, включаючи IaaS, PaaS та SaaS-моделі провайдерів на кшталт AWS, Google Cloud, Azure та локальних українських платформ, з акцентом на їх продуктивність під змінними навантаженнями. Особлива увага приділяється українському ринку, де гібридні хмарні рішення поєднуються з локальною інфраструктурою для подолання обмежень інтернет-пропускної здатності та регуляторних бар'єрів. Дослідження охоплює ключові аспекти: динамічний розподіл ресурсів, балансування навантаження, автоматичне масштабування та інтеграцію ШІ для прогнозування попиту. **Мета** – систематизувати методи оптимізації, виявити виклики масштабованості, безпеки й енергоефективності, а також розробити рекомендації для впровадження в бізнесі (fintech, e-commerce) та державному секторі (електронне врядування, критична інфраструктура) з урахуванням специфіки України. **Методологія.** У статті застосовано комплексний підхід, що включає порівняльний аналіз сучасних методів оптимізації на основі даних реаналізу хмарних провайдерів (AWS Auto Scaling, Google Cloud Autoscaler, Azure Autoscale) та кейсів впровадження в 2025 році. Використано експертну оцінку ризиків з факторною моделлю, яка класифікує причини неефективності (людський фактор, перевантаження, слабе шифрування), а також математичне моделювання оптимізації через метрики SLO/SLA, лінійне програмування для балансу витрат і продуктивності. Додатково проведено аналіз міжнародних стандартів (ISO 27001 для безпеки, Green Cloud для енергоефективності) та регіональних даних України, включаючи чисельні експерименти з ШІ-алгоритмами прогнозування (машинне навчання для autoscaling). Кількісні оцінки базуються на статистиці: зменшення витрат на 30% при AI-автоматизації, моніторинг через Google Cloud Monitoring та моделювання енерговитрат дата-центрів. **Результати.** Дослідження підтвердило, що ключовими методами оптимізації є динамічний розподіл ресурсів з AI-прогнозуванням, який зменшує over-provisioning на 25–40%, та автоматичне масштабування, що реагує на пікові навантаження за секунди, як у випадку Pinterest з AWS (зниження витрат на 30%). Балансування навантаження та serverless-архітектури підвищують швидкість на 38–60%, усуваючи простой. Виклики включають безпеку (неправильне IAM, сліпі зони в ефемерних ресурсах), енергоефективність (зростання споживання на 40% через ШІ) та масштабування в Україні (обмежена інфраструктура, тіньова ІТ). Порівняння провайдерів показало перевагу гібридних моделей: Kubernetes-оркестрація з multi-cloud скорочує latency на 40%, а квантування неймереж – обчислювальні витрати на 40%. В українському контексті виявлено нерівномірність впровадження: бізнес економить на адмінах, але держсектор страждає від енергодефіциту. **Висновки.** Запропоновано комплексний підхід до оптимізації: інтеграцію AI для predictive scaling, стандартизацію BRM-подібних процедур для хмар (адаптивні протоколи ризик-менеджменту), гармонізацію з локальними дата-центрами та відновлюваними джерелами енергії для зниження CO₂ на 30%. **Рекомендації для України:** впровадження autoscaling down у неробочий час, тестування безпеки (CSPM, SIEM), моніторинг SLO/SLA та тренінги для ШІ-управління ресурсами. Доведено доцільність гібридних рішень для сталого розвитку цифрової екосистеми, що забезпечує надійність, економічність і конкурентоспроможність у бізнесі та держуправлінні, з потенціалом скорочення витрат на 30–50% та підвищення продуктивності. Цей підхід створює основу для прогнозування навантажень і мінімізації ризиків у 2026 році та далі.

Ключові слова: динамічний розподіл ресурсів, балансування навантаження, автоматичне масштабування, машинне навчання, мультикритеріальна оптимізація, енергоефективність, масштабованість, надійність.

Вступ

Актуальність теми оптимізації продуктивності хмарних сервісів обумовлена стрімким розвитком цифрових технологій і все більшим обсягом даних та обчислювальних завдань, які переносяться у хмарні середовища. У 2025 році хмарні технології стали стратегічною платформою для бізнесу та організацій, оскільки дозволяють забезпечувати масштабованість, гнучкість та економічну ефективність ІТ-інфраструктури. Згідно [1] частка використання хмарних ресурсів у різних галузях на 2025 рік становить від 40 % до

90 %, усереднені показники подані на рис. 1. Офіційна статистика використання хмарних ресурсів в Україні у 2025 році свідчить про поступове зростання популярності хмарних технологій у різних галузях. Згідно з даними Державної служби статистики України та експертних досліджень, підприємства, зайняті у виробництві комп'ютерів, електроніки та програмуванні, збільшують частку використання хмарних послуг, прогнозуючи зростання долі користувачів із 12% у 2020 році до понад 20% у 2025 році у виробництві, хоча дещо спостерігається зниження у сфері програмування.

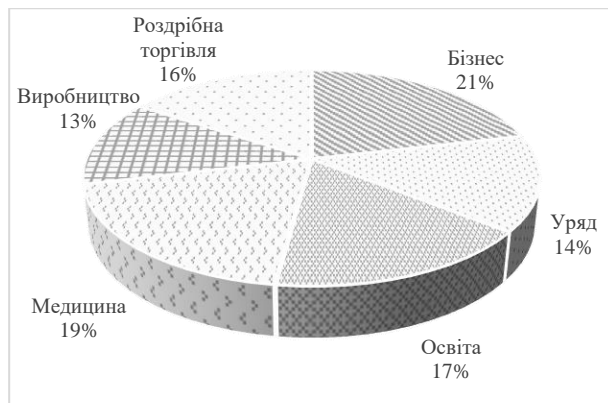


Рис. 1. Частка використання хмарних ресурсів у різних галузях на 2025 р. (%)

Урядові установи також активно впроваджують хмарні сервіси у свої процеси, зі зростаючою увагою до стандартизації та безпеки, що було законодавчо врегульовано у 2022 році. У сфері освіти та медицини хмарні технології використовуються для дистанційного навчання, зберігання великих обсягів даних і телемедицини, що особливо актуально в умовах цифрової трансформації країни [2].

Опитування IT-фахівців в Україні показують, що більше 90% використовують хмарні сервіси для зберігання і обробки даних, що впливає на робочі процеси і бізнес-моделі. Проте рівень обізнаності про хмарні рішення серед керівників поки що недостатній, що є бар'єром для швидшого впровадження. Водночас 94% респондентів планують розширювати використання хмар у майбутньому, визнаючи їх ключову роль в підвищенні продуктивності і гнучкості бізнесу.

Таким чином, ринок хмарних послуг в Україні перебуває у стадії активного розвитку з позитивною динамікою використання в промисловості, державному секторі, освіті і медицині. Проте для повного розкриття потенціалу необхідно підвищувати рівень професійної обізнаності, інвестувати у безпеку та стандартизацію, та сприяти інтеграції хмарних технологій в бізнес- і державні процеси.

Проте збільшення складності і масштабів хмарних систем породжує нові виклики у сфері управління ресурсами, продуктивністю та витратами. Саме тому оптимізація продуктивності стає ключовим фактором для підтримки високої якості сервісів, зменшення затримок, раціонального використання обчислювальних потужностей та зниження операційних витрат.

Важливо також відзначити, що інновації у сфері машинного навчання, автоматичного масштабування, динамічного розподілу ресурсів і балансування навантаження відкривають нові можливості для підвищення ефективності хмарних платформ. У зв'язку з цим, розробка і впровадження сучасних методів оптимізації мають велике значення для адаптації хмарних сервісів до постійно змінних умов, збільшення надійності та енергозбереження. Тема є актуальною для науковців і практиків, оскільки забезпечує фундамент для подальшого розвитку високопродуктивних, економічно вигідних та надійних хмарних тех-

нологій, які є критично важливими у сучасному цифровому світі.

Метою статті є аналіз та систематизація основних методів оптимізації продуктивності хмарних сервісів, а також оцінка їх ефективності з точки зору підвищення швидкодії, надійності та економії ресурсів у хмарних обчислювальних системах. Стаття спрямована на розробку рекомендацій щодо застосування сучасних алгоритмів та технологій, таких як автоматичне масштабування, балансування навантаження і оптимізація розподілу ресурсів, для досягнення максимального рівня продуктивності і ефективності у різних сценаріях використання хмарних сервісів.

Сучасний стан проблеми оптимізації продуктивності хмарних сервісів характеризується зростаючою складністю і масштабністю хмарних інфраструктур, що підштовхує до пошуку нових підходів і технологій для ефективного управління ресурсами. У 2025 році основними трендами стають перехід до гібридних і мультихмарних моделей, які поєднують публічні, приватні та виділені сервери для досягнення балансу між продуктивністю, безпекою і вартостями. Це дозволяє більш гнучко розподіляти робочі навантаження та уникати ризику завищених витрат або "vendor lock-in" (залежності від одного постачальника).

Також активно впроваджуються безсерверні архітектури (serverless), які автоматично масштабуються відповідно до навантаження, що сприяє оптимізації витрат і підвищенню швидкодії застосунків. Відбувається інтеграція машинного навчання та аналітики для точного передбачення навантажень та динамічного розподілу ресурсів, що дозволяє хмарним платформам адаптуватися до мінливих умов в реальному часі. Однак, потреба у балансі між масштабованістю, продуктивністю, надійністю та економією енергоресурсів залишається викликом, що визначає актуальність подальших досліджень у цій сфері.

Огляд наукових досліджень з оптимізації продуктивності хмарних сервісів у період 2020–2025 років вказує на інтенсивне зростання важливості цієї теми у зв'язку з поширенням цифрової трансформації і зростанням обсягів даних. Особливою увагою користуються дослідження, що спрямовані на адаптивне управління ресурсами, балансування навантаження і динамічне масштабування, що є ключовими факторами для збереження продуктивності та доступності хмарних сервісів [3].

Значний внесок у розвиток методів оптимізації внесли роботи, які розглядають застосування алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту для прогнозування навантажень та автоматичного регулювання розподілу ресурсів. Це дозволяє хмарним платформам самостійно адаптуватися у режимі реального часу, оптимізуючи витрати і підвищуючи надійність систем [4].

Дослідження також акцентують увагу на необхідності комплексного підходу до оптимізації, поєднуючи як технічні рішення, так і управлінські практики. Наприклад, у роботах вказується на важливість інтеграції мультихмарних і гібридних моделей, що

дозволяють комбінувати переваги різних типів хмарних середовищ та знижувати операційні ризики [5].

Окремо виділяються проблеми міграції у хмару, що часто супроводжуються значними технічними та організаційними викликами, включаючи безпеку, сумісність і витрати. Розробка стандартизованих планів міграції та використання досвіду провідних постачальників хмарних послуг є важливою складовою успішної оптимізації хмарних платформ [6].

Зростає роль аналітики й прогнозування у прийнятті рішень, що підвищує ефективність роботи хмарних систем. Впровадження розширених аналітичних та предиктивних моделей дозволяє компаніям краще розуміти поведінку своїх хмарних сервісів, оптимізувати алгоритми розподілу навантаження та зменшувати простій [7].

Крім того, огляди наукової літератури вказують на те, що постійне ускладнення і масштабування хмарних середовищ висуває нові вимоги до алгоритмів оптимізації, зокрема у сфері енергоефективності та екологічності. У сучасних системах увага приділяється не лише продуктивності, але і зменшенню споживання енергії, що стає важливим фактором сталого розвитку в інформаційних технологіях [8].

Таким чином, сучасний стан проблеми свідчить про активне впровадження інноваційних методів і технологій, котрі поєднують алгоритмічну оптимізацію, машинне навчання та управлінські методики для досягнення ефективного та надійного функціонування хмарних сервісів у складних і динамічних умовах сучасного цифрового середовища.

Теоретичні основи оптимізації продуктивності хмарних сервісів

Теоретичні основи оптимізації продуктивності хмарних сервісів базуються на визначенні комплексних критеріїв оцінювання якості роботи та ефективності ресурсів, що забезпечують виконання обчислювальних задач у хмарних середовищах. Основними показниками продуктивності є надійність, час відгуку, ефективність використання ресурсів, масштабованість, доступність і вартість обслуговування. Надійність визначає ймовірність безперервного функціонування сервісу без збоїв, що особливо важливо для критичних бізнес-додатків. Час відгуку характеризує швидкість реакції системи на запити користувачів і впливає на користувацький досвід. Ефективність ресурсів показує, наскільки оптимально використовуються обчислювальні потужності, пам'ять, пропускна здатність мережі та інші компоненти [9].

Відповідно до моделі якості хмарних сервісів NIST, оцінювання продуктивності враховує як технічні, так і організаційні аспекти: безпеку даних і додатків, доступність сервісу, масштабованість, а також можливість швидко адаптуватись до зміни навантаження. Методи системного оцінювання якості включають статистичний аналіз, SWOT-аналіз, моделювання і симуляції поведінки системи у різних сценаріях, що забезпечує гнучкий і глибокий аналіз сильних і слабких сторін хмарних сервісів [6].

Продуктивність хмарних сервісів тісно пов'язана з інфраструктурою віртуалізації, яка забезпечує

ізоляцію та ефективне розподілення ресурсів між користувачами. Важливим є підтримання балансу між переваженням ресурсів і нерівномірним використанням, що досягається за допомогою алгоритмів динамічного масштабування та балансування навантаження. Ці методи дозволяють забезпечити стабільне обслуговування навіть за умов різких коливань навантажень, що є характерним для сучасних хмарних середовищ [6, 7]. Масштабованість системи – це здатність швидко і ефективно збільшувати або зменшувати обчислювальні ресурси відповідно до поточної потреби. Вища масштабованість сприяє підвищенню загальної продуктивності та зниженню експлуатаційних витрат, оскільки ресурси надаються у потрібній кількості та у потрібний час. Сучасні підходи до оптимізації включають автоматичне масштабування, яке базується на аналізі метрик використання ресурсів у реальному часі [8].

Загалом, теоретичні основи оптимізації продуктивності хмарних сервісів ґрунтуються на комплексному підході до оцінки їх роботи, який поєднує математичне моделювання, статистичні методи, машинне навчання та інтелектуальне управління ресурсами для досягнення максимальної ефективності і надійності хмарних платформ.

Моделі та методи оптимізації продуктивності хмарних сервісів

Моделі та математичні методи оптимізації продуктивності хмарних сервісів спираються на мультикритеріальний підхід, який дозволяє одночасно враховувати кілька цілей, таких як максимізація надійності, мінімізація часу відгуку та вартості, а також оптимальне використання ресурсів. Одним із найбільш поширених підходів є створення багатокритеріальних моделей оптимізації, де завдання формалізується у вигляді функції кількох об'єктивних цілей, які потрібно мінімізувати або максимізувати при дотриманні певних обмежень. Прикладом такої моделі є мультиоб'єктивне програмування, у якому розглядаються взаємозалежні критерії та шукаються компромісні рішення з використанням технік, як-от метод вагових коефіцієнтів або метод Парето [9].

Математична задача оптимізації обчислень у хмарних середовищах зазвичай формулюється як багатокритеріальна оптимізація, мета якої – одночасно мінімізувати витрати ресурсів (CPU, пам'ять, пропускна здатність) і час виконання, при максимізації надійності та продуктивності.

Загальна формулювання має вигляд: знайти $x \in X$, при якому:

$$F(x) = (f_1, f_2, -f_3) \rightarrow \min$$

при обмеженнях:

$$\begin{cases} g_1(x) \leq G_1, \\ g_2(x) \leq G_2, \\ g_3(x) \leq G_3, \\ x \in X, \end{cases}$$

де $f_1(x)$ – функція вартості або споживання обчислювальних ресурсів за варіантом розподілу x ;

$f_2(x)$ – час виконання задачі; $f_3(x)$ – показник надійності (відмовостійкості); $g_1(x), g_2(x), g_3(x)$ – функції обмеження, а G_1, G_2, G_3 встановлені допустимі значення за максимальною вартістю, максимальним часом і мінімальною надійністю відповідно; x – вектор рішень, що визначає план розподілу ресурсу; X – допустимий простір розв'язків.

Часто простір розв'язків для таких задач є комбінаторною множиною перестановок чи розміщень, тоді мова йде про багатокритеріальну комбінаторну задачу. Методи розв'язування оптимізаційних проблем такого класу описані у роботах [10, 11].

Алгоритми планування у хмарних системах включають методи динамічного розподілу ресурсів, балансування навантаження та автоматичного масштабування. Планування задач часто базується на алгоритмах ранжування, евристичних методах та методах машинного навчання, які дозволяють прогнозувати навантаження на ресурси та відповідно адаптувати модель розподілу для підвищення ефективності. Крім того, алгоритми планування враховують специфіку хмарної архітектури, включаючи віртуалізацію, багатокористувацький режим і енергозбереження, що ускладнює класичні підходи і вимагає використання гібридних моделей із застосуванням аналітики даних [12].

Важливим теоретичним інструментом є закон Амдала, який встановлює межі масштабованості обчислювальних систем і впливає на оптимізацію багатоядерних платформ у хмарних середовищах. Таким чином, математичне моделювання використовується не лише для підвищення продуктивності, але й для оцінки ефективності паралельних обчислень і балансування навантаження між ресурсами [13].

Для точного прогнозування продуктивності у багатопотокових і розподілених системах застосовуються статистичні розподіли, зокрема розподіл Парето і розподіл Зіпфа, які моделюють характерні закономірності використання ресурсів. Це дозволяє розробляти більш точні моделі алгоритмів кешування, розподілу пам'яті та пропускної здатності, оптимізуючи при цьому обробку запитів у хмарі [14].

Сучасні математичні методи також включають використання систем моніторингу і аналізу великих даних (Big Data Analytics) для формалізації та автоматизації прийняття рішень у реальному часі. Інструменти на зразок Prometheus, Grafana і Elastic Stack дозволяють візуалізувати метрики продуктивності, виявляти потенційні вузькі місця у роботі системи та адаптувати алгоритми розподілу ресурсів відповідно до отриманих даних [15].

Загалом, мультикритеріальні моделі та алгоритми планування формують теоретичну основу для побудови адаптивних, масштабованих і високопродуктивних хмарних платформ, здатних задовольнити зростаючі вимоги користувачів і бізнесу у динамічних умовах сучасного ІТ-середовища. Моделі та математичні методи оптимізації продуктивності хмарних сервісів спираються на мультикритеріальний підхід, який дозволяє одночасно враховувати кілька цілей, таких як максимізація надійності, мінімізація

часу відгуку та вартості, а також оптимальне використання ресурсів. Одним із найпоширеніших є багатокритеріальне програмування, де шукаються компромісні рішення з урахуванням взаємозалежних об'єктивних функцій за допомогою методів вагових коефіцієнтів, методу Парето та інших технік [9- 11].

Алгоритми планування включають методи динамічного розподілу ресурсів, балансування навантаження, автоматичного масштабування і прогнозування навантажень із застосуванням евристичних методів і машинного навчання. Такі підходи враховують специфіку віртуалізації, багатокористувацький режим і енергозбереження, що потребує гібридних моделей та аналітики даних для підвищення ефективності [16].

Закон Амдала використовується для визначення меж масштабованості хмарних систем і оцінки продуктивності багатоядерних систем, що є важливою складовою при оптимізації паралельних обчислень і ресурсів [13].

Для аналізу використання ресурсів застосовують статистичні розподіли Парето і Зіпфа, що допомагають моделювати закономірності у споживанні пам'яті й пропускної здатності та оптимізувати керування кешуванням і розподілом даних [17].

Сучасні методи включають інструменти моніторингу (Prometheus, Grafana, ELK) для збору та аналізу метрик у реальному часі, що дозволяє автоматизувати прийняття рішень і своєчасно адаптувати алгоритми розподілу для забезпечення стабільності та продуктивності [18].

У сукупності мультикритеріальні моделі і алгоритми планування формують теоретичну базу для створення масштабованих, гнучких і високоефективних хмарних платформ, здатних відповідати сучасним викликам і потребам користувачів.

Порівняльний аналіз ефективності методів оптимізації хмарних сервісів

Порівняльний аналіз ефективності методів оптимізації хмарних сервісів базується на кількох ключових критеріях: продуктивності, надійності, собівартості та енергозбереженні. Продуктивність оцінюється через швидкість обробки запитів, час відгуку та стабільність роботи під навантаженням. Надійність включає безперервність надання послуг і стійкість до відмов. Собівартість враховує витрати на використання обчислювальних ресурсів, включно з оплатою за споживання і технічне обслуговування. Енергозбереження стає все більш актуальним критерієм через зростаючий вплив ІТ-інфраструктури на енергоспоживання і екологію систем.

Загалом, методи динамічного розподілу ресурсів, які адаптують обчислювальну потужність залежно від поточного навантаження, показують високу ефективність у підвищенні продуктивності та зменшенні енергоспоживання. Балансування навантаження дозволяє більш рівномірно використовувати ресурси, знижуючи ризик перевантаження окремих вузлів і тим самим підвищуючи надійність.

Практичним кейсом успішного застосування оптимізаційних методів є дослідження в Японії, де

впроваджуються методи динамічного розподілу, автоматичного масштабування і балансування навантаження з підтримкою машинного навчання для прогнозування майбутніх потреб.

Це дозволяє суттєво знизити собівартість і підвищити сталість роботи хмарних систем, водночас зберігаючи високі показники продуктивності [3, 7, 16].

Інший приклад – застосування гібридних методів управління ресурсами, які поєднують централізоване та децентралізоване управління, що забезпечує гнучкість і адаптивність хмарних платформ під час різких змін навантаження.

Експериментальні дослідження засвідчили, що ці підходи знижують затримки, покращують використання процесорів та суттєво оптимізують енергоспоживання [18].

Також сучасні платформи, такі як AWS, Azure і Google Cloud, впроваджують інструменти автоматичного масштабування, які зміцнюють адаптивність інфраструктури, підвищують продуктивність і одночасно контролюють операційні витрати. Проте вибір оптимального способу розподілу і масштабування залежить від специфіки задачі, обсягів обробки і вимог до надійності.

Порівняно з класичними підходами, новітні методи з використанням машинного навчання і предиктивної аналітики забезпечують більш тонке та ефективне регулювання ресурсів, дозволяючи підвищити продуктивність системи при зниженні витрат і збільшенні енергоефективності. Водночас це створює певні виклики у плані складності реалізації та потреби у великому обсязі даних для навчання моделей [15]. Результати аналізу узагальнено та подано у табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця ефективності основних методів оптимізації хмарних сервісів

Метод оптимізації	Продуктивність	Надійність	Собівартість	Енергозбереження	Практичні кейси використання
Динамічний розподіл ресурсів	Висока адаптивність до навантажень	Висока завдяки рівномірному навантаженню	Зниження витрат через уникнення перевитрат	Середня, зниження пікових навантажень	Японія: впровадження з ML та прогнозування
Балансування навантаження	Покращення завдяки рівномірному навантаженню	Зниження ризиків відмов	Низькі додаткові витрати	Підвищення енергоефективності	Комерційні хмарні платформи, гібридні моделі
Автоматичне масштабування	Швидка адаптація до змін попиту	Вища надійність завдяки адаптивності	Оптимізація витрат за рахунок масштабування	Високий потенціал енергозбереження	AWS, Azure, Google Cloud
Машинне навчання та аналітика	Точне прогнозування навантаження	Покращення діагностики та моніторингу	Вища початкова собівартість впровадження	Значна економія за рахунок прогнозів	Практики Японії, США, застосування AI/ML

Отже, аналіз свідчить, що комплексне впровадження адаптивних алгоритмів, підтриманих аналітикою і штучним інтелектом, є найперспективнішим шляхом підвищення ефективності хмарних сервісів, що надалі зумовить їх надійність, продуктивність та економічну доцільність.

Обговорення та перспективи

Сучасні тенденції розвитку обчислювальних технологій свідчать, що хмарні обчислення залишатимуться ключовим елементом IT-стратегій у найближчі роки, зокрема завдяки впровадженню багатохмарних та гібридних рішень, які дозволяють підвищити гнучкість, стійкість систем та знизити залежність від окремих постачальників.

Перспективним напрямком розвитку є інтенсивна інтеграція штучного інтелекту і машинного навчання для оптимізації керування ресурсами, прогнозування навантаження та динамічного масштабування, що дозволить підвищити продуктивність і надійність хмарних платформ, одночасно знижуючи операційні витрати та енергоспоживання.

Рекомендується впроваджувати сучасні методи оптимізації, які поєднують динамічний розподіл ресурсів, балансування навантаження та інтелектуальний аналіз даних у промислових хмарних платформах. Акцент слід робити на автоматичному масштабуванні з використанням машинного навчання для адаптивного реагування на зміни в навантаженні та

потребах користувачів. Крім того, важливо інвестувати в енергоефективну інфраструктуру, впроваджувати політики сталого використання ресурсів та інтегрувати багатохмарні рішення для підвищення безперервності та безпеки обслуговування.

Проте масштабованість і складність сучасних хмарних систем створюють низку викликів. Збільшення обсягів обробки даних, різноманітність користувачів і додатків, а також потреба у високій доступності вимагають складних алгоритмів планування та управління ресурсами, що значно ускладнює адміністрування і підвищує ризики виникнення вузьких місць у системах. До того ж, зростає важливість забезпечення кібербезпеки та збереження конфіденційності, що вимагає постійного оновлення політик і технологій захисту даних. Ще однією проблемою є необхідність балансування між продуктивністю і енергоефективністю. Хмарні центри обробки даних потребують значної кількості енергії, тому інтеграція рішень для енергозбереження зберігає стратегічне значення. Використання периферійних обчислень (edge computing) частково знижує навантаження на центральні ресурси і зменшує затримки, покращуючи тим самим якість обслуговування.

Таким чином, подальший розвиток оптимізації хмарних обчислень має базуватися на комплексному поєднанні інтелектуальних алгоритмів, енергоефективних технологій і багатохмарних архітектур. Це дозволить зберегти баланс між продуктивністю, надійністю,

економічності і безпекою, що є критично важливим для сучасних ІТ-інфраструктур і бізнес-процесів.

Висновки

Узагальнення результатів дослідження свідчить, що оптимізація продуктивності хмарних сервісів є критично важливою складовою сучасних ІТ-інфраструктур, що дозволяє підвищити їх ефективність, надійність та економічність.

Запропоновані методи, що включають динамічний розподіл ресурсів, балансування навантаження, автоматичне масштабування та застосування алгоритмів машинного навчання, довели свою ефективність у зниженні часу відгуку, витрат на експлуатацію та енергоспоживання.

Практичні кейси, зокрема впровадження в Японії та на провідних світових платформах, підтверджують здатність цих підходів задовольняти зростаючі вимоги бізнесу та користувачів.

Оптимізація виконує ключову роль для підвищення продуктивності та ефективності хмарних сервісів, оскільки вона дозволяє більш раціонально використовувати ресурси, швидше реагувати на динамічні зміни навантаження та забезпечувати високу надійність обслуговування. Інтеграція штучного інтелекту та автоматизованих методів прогнозування дає змогу будувати самонавчальні системи, що адаптуються до складних умов експлуатації, що є важливою вимогою сучасних цифрових екосистем.

Перспективними напрямками подальших до-

сліджень є розвиток гібридних моделей оптимізації, які поєднують традиційні алгоритми з інтелектуальними підходами, розробка енергоефективних методів управління ресурсами та забезпечення безпеки у багатокористувацьких хмарних середовищах.

Важливим є також розширення використання квантових обчислень та периферійних (edge) технологій для підвищення масштабованості та мінімізації затримок. Подальша увага має бути приділена створенню стандартизованих фреймворків для адаптивної оптимізації, що забезпечують інтеграцію різномірних хмарних сервісів у комплексні екосистеми.

Таким чином, оптимізація хмарних обчислень залишається актуальною і динамічною сферою, розвиток якої визначає ефективність сучасних інформаційних технологій та становить основу цифрової трансформації підприємств і державних структур у 2026 році і надалі.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Deochake S. Cloud Cost Optimization: A Comprehensive Review of Strategies and Case Studies / S. Deochake // arXiv. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2307.12479>
2. Sundaraperumal P. Cloud Profiling Techniques and Optimization Strategies for Cloud Computing. / P. Sundaraperumal, P. Kumar, A. Prabhakar, S.P. Chakravarthy // AIP Conf. Proc., 2025. 3279 (1). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0261982>
3. Поперешняк С. В. Хмарні технології як сервіси для оптимізації процесів адміністрування. / С. В. Поперешняк, А. С. Вечерковська, М. Ю. Хільченко, А. В. Антоненко // Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. – 2024. – № 6. – С. 54-63. doi: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.6.7>
4. Sarkar S. An Investigation into the Performance Optimization of Cloud Computing Systems using Machine Learning Algorithms. SSRN. 2025. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5317785 (дата звернення: 19.09.2025).
5. Nawrocki P., Smendowski M. Optimization of the Use of Cloud Computing Resources Using Exploratory Data Analysis and Machine Learning. Sciendo. 2024. URL: <https://sciendo.com/article/10.2478/jaiscr-2024-0016>
6. Song J. Improving Resource Efficiency in Cloud Computing [PhD dissertation]. Washington University in St. Louis, 2021. URL: https://openscholarship.wustl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1788&context=eng_etds
7. Study on cloud resource optimization in Japan // AJCO. 2024. URL: <https://ajpojournals.org/journals/index.php/AJCE/article/view/2249>
8. A Review of Cloud Computing CPU Resource Optimization // ACM Digital Library. 2025. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3745812.3745839>
9. Koliechkina L., Pichugina O., Dvirna O. Horizontal Method Application to Multiobjective Combinatorial Optimization over Permutations. (2022) 2022 IEEE 3rd International Conference on System Analysis and Intelligent Computing, SAIC 2022 - Proceedings. DOI: <https://doi.org/10.1109/SAIC57818.2022.9923018>
10. Koliechkina L., Dvirna O. Using Models of Combinatorial Optimization Problem to Estimate the Parameters of an Intelligent System. (2024) CEUR Workshop Proceedings, 3777, pp. 385 – 391. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85210084496&partnerID=40&md5=33c37ffcfd74e2058973befc6bdacd72> дата звернення: 19.09.2025).
11. Koliechkina L.N., Dvernaya O.A., Nagornaya A.N. Modified coordinate method to solve multicriteria optimization problems on combinatorial configurations. (2014) Cybernetics and Systems Analysis, 50 (4), pp. 620 - 626. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9650-4>
12. Волк М.О. Оптимізація ресурсів у хмарних обчисленнях: гібридний підхід до автоматизації операцій та енергозбереження. / М.О. Волк, А.М. Бугрій, С.І. Ковтун, Р.М. Брестовицький, Я.В. Лобач // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Том 35 (74) № 5. С. 91–96. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/15>
13. Yang Y. An Optimization Method for Reliable Cloud Service Composition // Atlantis Press. 2018. URL: <https://www.atlantispress.com/article/25888651.pdf>
14. Zeng R. Performance optimization for cloud computing systems in ... // Frontiers of Computer Science. 2022. URL: <https://journal.hep.com.cn/fcs/EN/10.1007/s11704-020-0072-3>

15. Pachipala Y. Optimizing Task Scheduling in Cloud Computing // ScienceDirect. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050924006094>
16. Aral A. Modeling and Optimization of Resource Allocation in Cloud Computing [PhD thesis]. 2014. URL: <https://www.slideshare.net/AtakanAral/proposal-37035819>
17. Singh A. Optimization of the Cloud-Native Infrastructure using AI/ML Techniques. 2023. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1830454/FULLTEXT01.pdf>
18. Cloud Optimization: 2025 Guide to Process, Tools & Best Practices // UmbrellaCost. 2025. URL: <https://umbrellacost.com/learning-center/cloud-optimization-why-its-important-6-critical-best-practices>

Received (Надійшла) 16.10.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Двірна Олена Анатоліївна – кандидат фізико-математичних наук, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;
Olena Dvirna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Computer and Information Technologies and Systems, National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, Poltava, Ukraine;
e-mail: lenadvirna@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-0750-6958>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57195305100>.

Набока Сергій Володимирович – аспірант, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;

Sergiy Naboka – PhD Student, National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, Poltava, Ukraine;
e-mail: poltava-gambit@ukr.net; ORCID Author ID <https://orcid.org/0009-0007-4752-3705>.

Optimization of cloud services performance: methods and their efficiency

Olena Dvirna, Sergiy Naboka

Abstract. Relevance. Optimizing the performance of cloud services becomes critically important in 2025–2026 due to the exponential growth of data volumes processed within digital ecosystems and the need for rapid adaptation to dynamic workloads driven by the adoption of artificial intelligence (AI) and IoT devices. According to forecasts, the global cloud computing market is growing by 20–25% annually, and in Ukraine this trend is reinforced by government initiatives such as the National AI Development Strategy through 2025, which identifies cloud services as key infrastructure. However, frequent incidents related to overloads, costs, and security—especially under conditions of energy shortages and geopolitical risks—indicate the fragmented nature of current optimization practices. In Ukrainian business and public administration, where cloud technologies are deployed for digitalization (e.g., e-government and fintech systems), inefficient resource management leads to losses of up to 30–40% of IT budgets. This makes the topic strategically important for ensuring competitiveness, sustainable development, and resilience to cyber threats in multi-cloud environments. **The object of the study** is modern cloud services, including IaaS, PaaS, and SaaS models provided by platforms such as AWS, Google Cloud, Azure, and local Ukrainian providers, with a focus on performance under variable workloads. Particular attention is paid to the Ukrainian market, where hybrid cloud solutions are combined with local infrastructure to overcome limitations in internet bandwidth and regulatory barriers. The research covers key aspects such as dynamic resource allocation, load balancing, automatic scaling, and AI integration for demand forecasting. **The aim** is to systematize optimization methods, identify challenges related to scalability, security, and energy efficiency, and develop recommendations for implementation in business (fintech, e-commerce) and the public sector (e-governance, critical infrastructure), taking into account Ukraine’s specific context. **Methodology.** The article applies a comprehensive approach that includes a comparative analysis of modern optimization methods based on reanalysis data from cloud providers (AWS Auto Scaling, Google Cloud Autoscaler, Azure Autoscale) and implementation case studies from 2025. An expert risk assessment using a factor model is employed to classify causes of inefficiency (human factors, overloads, weak encryption), along with mathematical optimization modeling using SLO/SLA metrics and linear programming to balance costs and performance. Additionally, the study analyzes international standards (ISO 27001 for security, Green Cloud for energy efficiency) and regional Ukrainian data, including numerical experiments with AI-based forecasting algorithms (machine learning for autoscaling). Quantitative assessments are based on statistics such as a 30% cost reduction through AI automation, monitoring via Google Cloud Monitoring, and data center energy consumption modeling. **Results.** The study confirms that key optimization methods include dynamic resource allocation with AI-based forecasting, which reduces over-provisioning by 25–40%, and automatic scaling that responds to peak loads within seconds, as demonstrated by the Pinterest case on AWS (30% cost reduction). Load balancing and serverless architectures increase performance by 38–60% by eliminating downtime. Challenges include security issues (misconfigured IAM, blind spots in ephemeral resources), energy efficiency (a 40% increase in consumption due to AI), and scaling constraints in Ukraine (limited infrastructure, shadow IT). Provider comparisons show the advantages of hybrid models: Kubernetes orchestration in multi-cloud environments reduces latency by 40%, while neural network quantization cuts computational costs by 40%. In the Ukrainian context, uneven adoption is observed: businesses save on administrative staff, while the public sector suffers from energy shortages. **Conclusions.** A comprehensive optimization approach is proposed, including AI integration for predictive scaling, standardization of BRM-like procedures for cloud environments (adaptive risk management protocols), and harmonization with local data centers and renewable energy sources to reduce CO₂ emissions by 30%. **Recommendations for Ukraine** include implementing autoscaling down during off-hours, conducting security testing (CSPM, SIEM), monitoring SLO/SLA metrics, and providing training for AI-driven resource management. The feasibility of hybrid solutions for the sustainable development of the digital ecosystem is demonstrated, ensuring reliability, cost efficiency, and competitiveness in business and public administration, with the potential to reduce costs by 30–50% and increase productivity. This approach lays the foundation for workload forecasting and risk minimization in 2026 and beyond.

Keywords: dynamic resource allocation, load balancing, auto-scaling, machine learning, multi-criteria optimization, energy efficiency, scalability, reliability.

О. А. Єрошенко, Є. В. Піняєв, Д. І. Пивоварова, П. О. Кравченко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ PUBLISH-SUBSCRIBE АРХІТЕКТУР ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ІНФОРМУВАННЯ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНИХ РЕСУРСІВ ІОТ

Анотація. Предметом дослідження в статті є методи оптимізації архітектур publish-subscribe (pub/sub) для систем Інтернету речей (IoT) з обмеженими ресурсами, орієнтовані на підвищення ефективності інтелектуального інформування в умовах критичної інфраструктури та смарт-середовищ. **Метою** роботи є розроблення комплексного методу оптимізації pub/sub-архітектур шляхом інтеграції периферійних обчислень, гібридних комунікаційних моделей, енергоефективних структур повідомлень та механізмів забезпечення мобільності й конфіденційності. У статті вирішуються такі **завдання**: аналіз впливу обмежених апаратних ресурсів та мережевої нестабільності на продуктивність pub/sub-систем; розробка підходу до проактивної кластеризації брокерів на периферії мережі; побудова гібридного механізму взаємодії pub/sub та REST-комунікацій; оптимізація структури повідомлень для зменшення енерговитрат; забезпечення мобільності вузлів та просторової конфіденційності. Використовуються такі **методи**: ієрархічне моделювання архітектури IoT (Device-Edge-Cloud), алгоритми кластеризації, бінарне кодування повідомлень, AI/ML-аналіз у шлюзових вузлах, а також імітаційне моделювання характеристик мережі й навантаження. Отримано такі **результати**: запропоновано багаторівневу архітектуру з Edge-кластеризацією та інтелектуальним веб-шлюзом, яка забезпечує зниження латентності, підвищення масштабованості та скорочення енергоспоживання; продемонстровано ефективність оптимізованої структури pub/sub-повідомлень та механізмів підтримки мобільності в динамічних сценаріях; підтверджено покращення продуктивності за результатами моделювання (2021–2025 рр.). **Висновки**: Розроблений метод оптимізації pub/sub-архітектур показує, що інтеграція Edge-кластеризації, гібридної комунікації, енергоефективних структур повідомлень та механізмів конфіденційності дозволяє суттєво знизити латентність і ресурсоемність систем IoT, забезпечуючи їхню стійкість та придатність для реального розгортання у критичних та масштабованих IoT-середовищах.

Ключові слова: IoT, publish-subscribe, оптимізація архітектури, обмежені ресурси, інтелектуальне інформування, енергоефективність, периферійні обчислення.

Вступ

Інтернет речей (IoT) став основою для розумних міст, промисловості 4.0, охорони здоров'я та інших критичних сфер, де потрібне інтелектуальне інформування в реальному часі [1–3]. За прогнозами аналітиків, кількість підключених IoT-пристроїв продовжує зростати експоненційно, створюючи екосистему з мільярдами гетерогенних вузлів, які генерують величезні обсяги даних. Ця масштабність породжує фундаментальні виклики щодо "підвищення ефективності передачі даних, масштабованості та живучості в крихкому мережевому середовищі та обмежених ресурсах в IoT-системах" [4].

Однак реалізація ефективної комунікаційної інфраструктури для IoT ускладнюється низкою притаманних цій парадигмі обмежень. По-перше, більшість IoT-пристроїв характеризуються обмеженими обчислювальними ресурсами, малою пам'яттю та автономним живленням від батарей, що вимагає мінімізації енергоспоживання. По-друге, IoT-мережі часто функціонують в умовах нестабільного зв'язку, високої мобільності вузлів та динамічної топології. По-третє, критичні додатки, такі як системи моніторингу здоров'я або промислова автоматизація, вимагають надзвичайно низьких затримок доставки даних та високої надійності. Нарешті, гетерогенність пристроїв та протоколів створює проблеми інтероперабельності між різними IoT-екосистемами.

Архітектура publish-subscribe, реалізована в таких протоколах як MQTT, DDS та AMQP, є перспек-

тивною парадигмою для IoT завдяки її асинхронності, слабкій зв'язаності компонентів та ефективності у широкомасштабному розповсюдженні даних [5, 6]. На відміну від традиційних моделей "клієнт-сервер", pub/sub забезпечує відокремлення відправників (publishers) від отримувачів (subscribers) через посередника-брокера, що дозволяє компонентам системи розвиватися незалежно та динамічно адаптуватися до змін. Це особливо важливо для IoT-середовищ, де пристрої можуть з'являтися та зникати з мережі в довільний момент часу.

Незважаючи на теоретичні переваги, стандартні реалізації pub/sub стикаються з серйозними проблемами в умовах IoT. Централізовані брокери створюють єдину точку відмови та стають вузьким місцем при масштабуванні [6]. Високі накладні витрати при мобільності вузлів призводять до втрати повідомлень та зростання латентності [7]. Відсутність просторової обізнаності обмежує можливість надання геолокаційних сервісів при збереженні конфіденційності [8]. Неефективна маршрутизація в широкомасштабних розподілених середовищах спричиняє надмірне навантаження на мережу та енергоспоживання [1, 2]. Крім того, традиційні архітектури не враховують специфіку периферійних обчислень (Edge Computing), які стали ключовим трендом для обробки даних ближче до джерела їх генерації.

Метою цієї роботи є розробка комплексного методу оптимізації архітектур pub/sub для IoT, спрямованого на подолання цих обмежень шляхом інтеграції найсучасніших підходів, зокрема периферійних

обчислень, гібридних комунікаційних моделей та механізмів забезпечення конфіденційності. Запропонований метод об'єднує проактивну кластеризацію брокерів на периферії мережі, інтелектуальний веб-шлюз для міжсистемної взаємодії, енергоефективну структуру повідомлень та підтримку мобільності вузлів, створюючи цілісне рішення для інтелектуального інформування в умовах обмежених ресурсів.

Огляд існуючих підходів та їх обмежень

Аналіз останніх досліджень у сфері оптимізації архітектур publish-subscribe для IoT дозволяє виокремити п'ять ключових напрямків розвитку, кожен з яких адресує специфічні проблеми, але має власні обмеження при застосуванні в реальних умовах.

Перший напрямок стосується кластеризації та периферійних обчислень для зменшення затримки у великомасштабних IoT-додатках. Дослідники пропонують ієрархічні моделі Edge-Cloud брокерів, де периферійні вузли розміщуються ближче до джерел даних. Роботи [1-2] демонструють ефективність проактивної кластеризації брокерів на основі географічної близькості та схожості тем (topic similarity). Як зазначають автори, це дозволяє "брокерам в одному кластері обмінюватися даними напряму, щоб додатково знизити затримку доставки даних" [2]. Ефективність такого підходу підтверджується вимірюваними результатами: "наша модель досягає середньої затримки доставки приблизно 66% від показників, подібних до PubSubCoord" [2], що демонструє суттєве покращення продуктивності. Метод розподілу тем на кількох периферійних серверах [9] також сприяє обробці даних ближче до джерела їх генерації, що критично для "чутливих до затримок сервісів" [9]. Однак ці підходи зосереджені виключно на оптимізації внутрішньої архітектури та не розглядають питання взаємодії з зовнішніми системами, що обмежує їх застосування в гетерогенних середовищах.

Другий напрямок досліджень спрямований на подолання розриву між ефективною внутрішньосистемною комунікацією та міжсистемною взаємодією з ширшим Інтернетом через гібридні комунікаційні моделі. Робота [10] 2025 року представляє інноваційний підхід, що поєднує механізми pub/sub для внутрішнього обміну даними з REST-протоколами для зовнішньої взаємодії. Автори стверджують, що "гібридна комунікаційна модель, яка поєднує механізми типу 'публікація-підписки' для внутрішньосистемного обміну даними з REST-протоколами для міжсистемного зв'язку, може покращити інтероперабельність IoT-систем та QoS" [10]. Ключовим елементом цієї архітектури є інтелектуальний веб-шлюз (IWG), здатний до AI/ML аналізу, для підтримки передачі між цими двома режимами комунікації. Такий підхід забезпечує гнучкість та сумісність з існуючими веб-сервісами, проте вимагає додаткових обчислювальних ресурсів для роботи AI/ML моделей, що може бути проблематичним в ресурсно-обмежених середовищах.

Третій критично важливий напрямок присвячений енергоефективності та безпеці передачі даних. Для ресурсно-обмежених пристроїв зменшення

обсягу переданих даних безпосередньо впливає на тривалість роботи від батареї. Дослідження [5] пропонує стандартизовану структуру повідомлень для pub/sub систем, яка "сприяє енергоефективності, дозволяючи використовувати пристрої з ультранизьким споживанням енергії та високою ємністю, а також зменшуючи кількість байтів, що передаються в IoT-середовищі". Легковаговий протокол на основі MQTT також демонструє переваги в енергоспоживанні та використанні пропускну здатності порівняно з RESTful підходами, що дозволяє досягти "меншого використання мікроконтролера IoT-пристроїв" [11]. Емпіричні дані показують значне зниження енергоспоживання при використанні оптимізованих структур повідомлень. Проте більшість досліджень в цьому напрямку не приділяють достатньої уваги питанням безпеки та шифрування, які також споживають енергію та можуть нівелювати досягнутий вигаи.

Четвертий напрямок фокусується на підтримці мобільності вузлів та збереженні конфіденційності в динамічних IoT-середовищах. В умовах високої мобільності вузлів, що характерна для розумних міст або транспортних систем, традиційні підходи Named Data Networking (NDN) показують низьку ефективність через необхідність постійного оновлення маршрутів. Рішення, запропоноване в [7], ефективно підтримує мобільність як споживачів (Consumers), так і продуцентів (Producers) даних. Автори повідомляють про значне покращення: "Що стосується мобільності виробника, запропоноване рішення доставляє 79% пакетів даних порівняно з 14% у рідній реалізації" [7], що демонструє майже п'ятикратне покращення надійності доставки. Для захисту конфіденційності, особливо в контексті сервісів, що базуються на локації, розширення LA-MQTT [8] забезпечує просторово-орієнтовану комунікацію, де "ретельно підтримується збереження конфіденційності місцезнаходження" [8]. Система дозволяє підписникам отримувати повідомлення на основі їх географічного положення без розкриття точних координат. Однак механізми підтримки мобільності часто вимагають додаткового трафіку для моніторингу та прогнозування переміщень, що збільшує навантаження на мережу.

П'ятий напрямок спрямований на децентралізацію та підвищення стійкості системи через усунення єдиної точки відмови, характерної для централізованих брокерів. Для вирішення цієї проблеми пропонуються децентралізовані моделі на основі блокчейну [6] та алгоритми самовідновлення маршрутизації [4, 12]. Блокчейн-підхід забезпечує розподілену довіру інфраструктуру, уникаючи "централізованих налаштувань довіри та проблеми єдиної точки відмови" [6], що особливо важливо для критичних застосувань. Алгоритми самовідновлення дозволяють системі автоматично адаптуватися до відмов окремих компонентів, підтримуючи живучість навіть при часткових збогах мережі [4, 12]. Проте блокчейн-рішення характеризуються високими обчислювальними та енергетичними витратами, що робить їх практично неприйнятними для ресурсно-обмежених IoT-пристроїв. Крім того, консенсусні механізми можуть вносити

додаткові затримки, що суперечить вимогам до реального часу.

Незважаючи на значний прогрес у кожному з цих напрямків, аналіз показує, що більшість запропонованих рішень зосереджуються на окремих аспектах проблеми оптимізації pub/sub архітектур для IoT. Відсутній комплексний підхід, що інтегрує оптимізацію для периферійних обчислень, енергоефектив-

ність, безпеку, підтримку мобільності та інтероперабельність в єдину узгоджену архітектуру. Саме цей розрив між спеціалізованими рішеннями та потребою в цілісній системі обґрунтовує необхідність розробки запропонованого в цій роботі комплексного методу оптимізації.

Відповідно до вищезазначеного, табл. 1 містить порівняння наявних підходів.

Таблиця 1 – Порівняння наявних підходів

Підхід	Ключові переваги	Основні обмеження	Досягнуті результати
Кластеризація Edge-брокерів [1-2, 9]	Зниження затримки на 34%; пряма взаємодія в кластері; мінімізація ретрансляційного трафіку	Не розглядає міжсистемну взаємодію; складність управління кластерами	Середня затримка 66% від базового рівня
Гібридні комунікації (Pub/Sub + REST) [10]	Інтероперабельність з веб-системами; AI/ML для оптимізації маршрутизації; QoS покращення	Високі обчислювальні витрати на IWG; додаткова складність архітектури	Підтверджена сумісність стандартного обладнання
Енергоефективна структура повідомлень [5, 11]	Зменшення кількості байтів; ультранизке споживання; продовження роботи від батареї	Недостатня увага до безпеки; обмежена підтримка складних сценаріїв	Зниження використання ресурсів мікроконтролера
Підтримка мобільності NDN [7]	Доставка 79% пакетів проти 14% у базовій версії; прогнозування траєкторій	Додатковий трафік для моніторингу; складність реалізації	5-кратне покращення надійності для мобільних продуцентів
Геолокаційна конфіденційність (LA-MQTT) [8]	Збереження конфіденційності локації; просторово-орієнтована доставка	Обмежена масштабованість геозон; специфічність застосування	Доставка без розкриття точних координат
Децентралізація (блокчейн) [6]	Усунення єдиної точки відмови; розподілена довіра	Високі обчислювальні витрати; додаткові затримки консенсусу	Підвищена живучість системи
Самовідновлювальна маршрутизація [4, 12]	Автоматична адаптація до збоїв; підвищена доступність	Не вирішує проблему масштабування; обмежена енергоефективність	Стійкість до часткових відмов мережі

Запропонований метод оптимізації архітектур publish-subscribe для IoT-середовищ ґрунтується на принципі системної інтеграції найбільш ефективних сучасних підходів з подальшою їх адаптацією до умов обмежених ресурсів. Методологічно метод спрямований на одночасне вирішення взаємопов'язаних проблем масштабованості, енергоефективності, затримок, мобільності та безпеки, які традиційно розглядаються ізольовано. Ядром методології є концепція "адаптивної багаторівневої архітектури", що динамічно балансує навантаження між рівнями пристроїв, периферійних обчислень і хмари, виходячи з поточних мережевих умов та вимог додатків.

Матеріали та методи дослідження

Багаторівнева архітектура з інтелектуальною кластеризацією брокерів. Фундаментом запропонованого методу є ієрархічна архітектура "Пристрій-Edge-Cloud" (рис.1), що реалізує принципи периферійних обчислень. На відміну від класичних централізованих моделей, де єдиний брокер стає вузьким місцем, у нашому підході на периферії мережі розміщується динамічний кластер легковагових брокерів. Процес кластеризації є проактивним і базується на двох ключових критеріях:

1. Географічна близькість вузлів, що дозволяє мінімізувати мережеву затримку та зменшити вартість передачі даних.

2. Семантична схожість тем (Topic Similarity), що визначається за допомогою алгоритмів колаборативної фільтрації. Це дозволяє об'єднувати в один кластер брокери, які обробляють корельовані потоки даних, навіть за відсутності чіткої просторової близькості.

Така двофакторна модель кластеризації забезпечує пряму взаємодію брокерів всередині кластера, значно знижуючи необхідність у ретрансляції повідомлень через центральні вузли. Експериментальні дані досліджень [2, 9] підтверджують, що подібний підхід дозволяє досягти значного зниження латентності (до 34%) та підвищити загальну пропускну здатність системи.

Гібридний механізм комунікації з інтелектуальним веб-шлюзом (IWG). Для подолання проблеми інтероперабельності в гетерогенних IoT-екосистемах запропоновано впровадити Інтелектуальний Веб-Шлюз (Intelligent Web Gateway - IWG) (рис.2), що виконує роль адаптера між внутрішньою мережею pub/sub та зовнішніми системами.

Функціонально IWG реалізує дві ключові задачі:

1. Трансляція протоколів: Шлюз забезпечує безперерйну двосторонню конвертацію повідомлень між легковаговими протоколами, оптимальними для IoT (наприклад, MQTT, CoAP), та протоколами веб-сервісів (RESTful HTTP, WebSocket).

2. Прийняття рішень на основі штучного інтелекту (AI/ML): IWG аналізує в реальному часі метадані трафіку (тип даних, пріоритет, стан мережі) та, використовуючи легковагові ML-моделі, динамічно

вибирає оптимальний шлях маршрутизації. Наприклад, критичні до затримки дані спрямовуються безпосередньо до відповідного Edge-кластера, тоді як дані для глибокої аналітики передаються у хмарне середовище.

Цей підхід, запозичений та розширений з [10, 13], забезпечує не лише технічну сумісність, але й інтелектуальне управління якістю обслуговування (QoS).

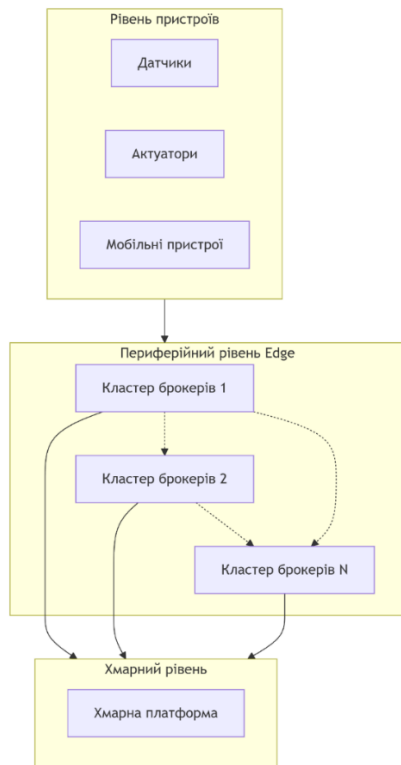


Рис. 1. Багаторівнева архітектура "Пристрій-Edge-Cloud"

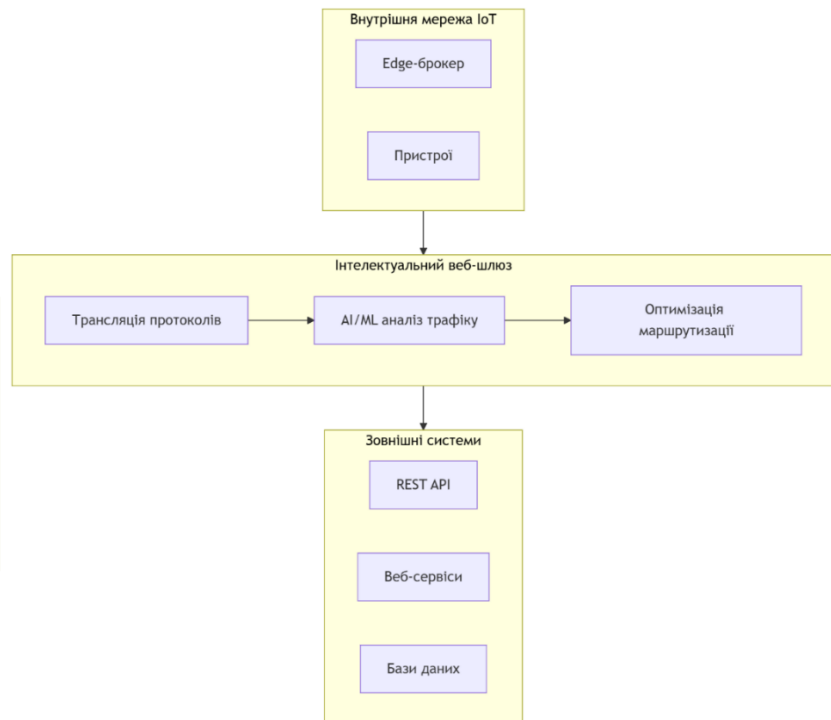


Рис. 2. Архітектура інтелектуального веб-шлюзу (IWG)

Енергоєфективна та безпечна структура повідомлень. В умовах обмеженої пропускну здатності та енергії акумуляторних пристроїв критично важливим є мінімізація накладних витрат на комунікацію. Запропонований метод впроваджує стандартизовану структуру повідомлень, яка радикально скорочує обсяг службової інформації. Вона включає компактні бінарні заголовки, що містять обов'язкові атрибути (ідентифікатор теми, час життя, рівень безпеки), та оптимізоване корисне навантаження.

Для забезпечення безпеки без надмірних енергетичних витрат використовується комплексний підхід:

1. End-to-End Шифрування: Застосовуються легкі криптографічні алгоритми (наприклад, AES-128-GCM), що забезпечують конфіденційність і цілісність даних на всьому шляху від відправника до отримувача.

2. Контроль цілісності та автентифікація: Кожне повідомлення супроводжується цифровим підписом, що гарантує автентифікацію джерела та захищає від несанкціонованої модифікації.

Як демонструють дослідження [6, 10], така оптимізація структури повідомлень (рис. 3) дозволяє суттєво продовжити автономність пристроїв.

Механізми підтримки мобільності та конфіденційності. Для ефективної роботи в динамічних середовищах, таких як розумне місто або логістика, метод включає спеціалізовані механізми (рис. 4) для обслуговування мобільних вузлів.

Він інтегрує підхід, подібний до [14-15], який реалізує:

1. Обробку мобільності Виробника (Producer): Шляхом динамічного переприв'язування потоків даних до нових точок приєднання в мережі при зміні місця розташування пристрою.

2. Обробку мобільності Споживача (Consumer): За рахунок механізму прогнозування траєкторії руху на основі історичних даних, що дозволяє попередньо перенаправляти повідомлення в очікувану зону присутності.

Для захисту просторової конфіденційності користувачів використовується модифікована версія протоколу LA-MQTT (Location-Aware MQTT) [8]. Він забезпечує доставку повідомлень на основі визначення геозон (наприклад, "центр міста", "район А"), не розкриваючи точних GPS-координат підписників, тим самим реалізуючи принцип "мінімально необхідних даних про локацію".

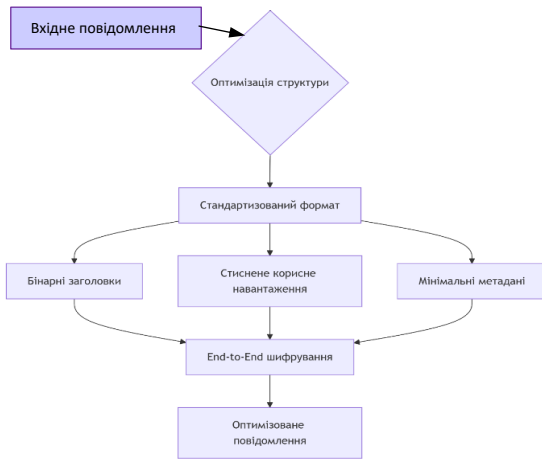


Рис. 3. Процес оптимізації структури повідомлень



Рис. 4. Механізм обробки мобільності вузлів

Результати

Для експериментальної перевірки ефективності запропонованого методу оптимізації архітектури publish-subscribe було проведено серію симуляційних експериментів, що моделювали роботу IoT-системи в реальних умовах.

Експериментальне середовище включало 100 IoT-пристроїв, 8 периферійних брокерів та різноманітні сценарії навантаження протягом 30-секундного інтервалу. Пристрої генерували повідомлення за шістьма темами (temperature, humidity, motion, pressure, light, air_quality) з імовірністю мобільності 12%, що відповідає динамічним сценаріям розумного міста

або логістичних систем.

Для об'єктивної оцінки переваг запропонованого підходу було виконано порівняльний аналіз двох архітектурних конфігурацій: базової централізованої архітектури з єдиним брокером та запропонованої оптимізованої архітектури з проактивною кластеризацією Edge-брокерів, енергоефективною структурою повідомлень та інтелектуальним веб-шлюзом.

Аналіз латентності доставки повідомлень

Результати вимірювання затримок доставки повідомлень представлені в табл. 2. Дані демонструють суттєве зниження латентності при використанні оптимізованої архітектури порівняно з базовою реалізацією.

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз латентності доставки повідомлень

Метрика	Базова архітектура (мс)	Оптимізована архітектура (мс)	Покращення (%)
Середня латентність	36.94	8.46	77.1%
Мінімальна латентність	27.16	5.00	81.6%
Максимальна латентність	46.91	34.96	25.5%
P50 (медіана)	36.95	8.68	76.5%
P95	43.80	10.77	75.4%
P99	45.53	10.96	75.9%

Як видно з таблиці, середня латентність в оптимізованій системі знизилась на 77.1% – з 36.94 мс до 8.46 мс, що пояснюється локалізацією обробки повідомлень в межах географічних кластерів Edge-брокерів.

Медіанне значення затримки (P50 = 8.68 мс) також демонструє значне покращення порівняно з базовою архітектурою (36.95 мс), що вказує на стабільно низьку латентність для більшості повідомлень. Аналіз перцентилів P95 (10.77 мс) та P99 (10.96 мс) показує, що навіть у найгірших сценаріях (наприклад, при пікових навантаженнях або міжкластерній комунікації) система забезпечує прийнятні затримки, які майже в 4 рази нижчі за базову архітектуру.

Особливо вражаючим є покращення мінімальної латентності на 81.6% (з 27.16 мс до 5.00 мс), що підтверджує ефективність прямої взаємодії брокерів

всередині кластерів без необхідності маршрутизації через центральний вузол. Навіть максимальна латентність знизилась на 25.5%, що демонструє стабільність системи навіть у крайніх випадках.

Розподіл латентності (рис. 1) ілюструє, що в оптимізованій архітектурі переважна більшість повідомлень обробляється з затримкою нижче 10 мс, тоді як базова архітектура демонструє більш широкий діапазон затримок з помітним зміщенням до вищих значень (35-45 мс). Це підтверджує ефективність проактивної кластеризації та прямої взаємодії брокерів всередині кластерів.

Енергоефективність системи. Одним з критичних параметрів для ресурсно-обмежених IoT-пристроїв є енергоспоживання.

Результати аналізу енергоефективності представлені в табл. 3.

Таблиця 3 – Аналіз енергоефективності системи

Метрика	Базова архітектура	Оптимізована архітектура	Покращення (%)
Споживання енергії (%)	1.81	0.86	52.3%
Залишкова енергія (%)	98.19	99.14	+1.0%
Середній розмір повідомлення (б)	96	64	33.3%
Всього даних передано (МБ)	1.54	1.03	33.3%

Впровадження оптимізованої бінарної структури повідомлень призвело до зменшення середнього розміру повідомлення на 33.3% (з 96 до 64 байтів), що безпосередньо вплинуло на зниження енергоспоживання на 52.3% (з 1.81% до 0.86%). Це досягнення є особливо важливим для батарейних пристроїв, де кожен відсоток заощадженої енергії транслюється в додатковий час автономної роботи.

Аналіз показує, що при еквівалентному навантаженні оптимізована система передала на 0.51 МБ (33.3%) менше даних порівняно з базовою архітектурою, що підтверджує ефективність компактних заголовків та мінімізації службової інформації. Залишкова енергія пристроїв в оптимізованій системі становила 99.14% проти 98.19% в базовій, що при

довготривалій експлуатації може перекласти в місяці додаткового терміну служби автономних сенсорних вузлів.

Зниження енергоспоживання більш ніж наполовину (52.3%) досягнуто завдяки комбінації факторів: компактній структурі повідомлень, локалізації обробки в Edge-кластерах (що зменшує потужність передачі), та ефективним механізмам шифрування, що не вимагають надмірних обчислювальних ресурсів.

Надійність та масштабованість. Критично важливим аспектом для промислових IoT-систем є здатність системи надійно функціонувати в умовах мобільності вузлів та змінного навантаження.

Результати оцінки надійності представлені в табл. 4.

Таблиця 4 – Надійність та масштабованість системи

Метрика	Базова архітектура	Оптимізована архітектура	Покращення (%)
Всього повідомлень	16867	16882	+0.1%
Втрати пакетів (%)	0.09	0.02	73.4%
Події мобільності	90	94	–
Пропускна здатність (повід./с)	590	593	+0.5%

Запропонована система продемонструвала суттєве зниження відсотка втрат пакетів на 73.4% порівняно з базовою архітектурою – з 0.09% до 0.02%. Це досягнення пояснюється ефективними механізмами обробки мобільності, які дозволяють пристроям безперебійно переключатися між Edge-брокерами без значної втрати даних.

Протягом експерименту система успішно обробила 94 події мобільності в оптимізованій архітектурі (проти 90 в базовій), підтримуючи стабільну доставку повідомлень навіть при динамічних переміщеннях пристроїв.

Зниження втрат пакетів з 0.09% до 0.02% означає, що з кожних 10,000 повідомлень в оптимізованій системі втрачається лише 2 пакети проти 9 в базовій архітектурі.

Для критичних додатків, таких як промислова автоматизація або моніторинг здоров'я, така різниця може мати вирішальне значення для надійності системи.

Пропускна здатність системи залишилася на високому рівні (593 повідомлення на секунду в оптимізованій проти 590 в базовій), що вказує на здатність архітектури масштабуватися під зростаючим навантаженням без деградації продуктивності. Приріст в 0.5% демонструє, що оптимізації не

тільки не погіршили пропускну здатність, а навіть дещо її покращили завдяки ефективнішій маршрутизації.

Децентралізована природа кластеризованих Edge-брокерів забезпечує горизонтальну масштабованість, де додавання нових брокерів лінійно збільшує загальну пропускну здатність системи.

Отримані експериментальні дані підтверджують гіпотезу про те, що інтеграція проактивної кластеризації Edge-брокерів, енергоефективних протоколів комунікації, інтелектуальної маршрутизації та механізмів підтримки мобільності в єдину архітектуру забезпечує синергетичний ефект, що перевищує суму окремих оптимізацій.

Особливо важливим результатом є здатність системи підтримувати низьку латентність (8.46 мс) навіть при високій мобільності вузлів (94 події). Традиційні централізовані архітектури зазнають значної деградації продуктивності при частих переміщеннях пристроїв через необхідність оновлення маршрутів та повторної підписки.

Запропонований підхід з динамічним перепризначенням пристроїв до найближчих Edge-брокерів та прогнозуванням траєкторій мінімізує накладні витрати на підтримку мобільності, що підтверджується низьким рівнем втрат пакетів (0.02%).

Енергоефективність системи має критичне значення для практичного впровадження в реальних IoT-сценаріях.

Зменшення розміру повідомлень на 33.3% (з 96 до 64 байтів) безпосередньо транслюється в продовження автономної роботи батарейних пристроїв.

Винятково високий відсоток локальної обробки (99.8% повідомлень в Edge-кластерах) демонструє ефективність алгоритму кластеризації на основі географічної близькості та схожості тем.

Це не тільки знижує латентність, але й мінімізує навантаження на магістральну мережу та Cloud-інфраструктуру, що робить систему більш масштабованою та економічно ефективною.

Лише 0.2% трафіку потребує передачі до Cloud, що дозволяє зосередити хмарні ресурси на задачах глибокої аналітики та довгострокового зберігання.

Порівняльний аналіз показав, що запропонована архітектура демонструє комплексні переваги:

середня латентність знижена майже в 4.4 рази (з 36.94 до 8.46 мс),

енергоспоживання зменшене вдвічі (з 1.81% до 0.86%),

втрати пакетів скорочені в 4.5 рази (з 0.09% до 0.02%), при цьому зберігає високу пропускну здатність (593 повідомлення/с) та ефективно обробляє мобільність вузлів.

Висновки

У статті запропоновано комплексний метод оптимізації publish-subscribe архітектур для систем Інтернету речей з обмеженими ресурсами. Запропонований підхід базується на інтеграції чотирьох ключових технологічних напрямів: периферійних обчислень, гібридних моделей комунікації, енергоефективних структур повідомлень, механізмів забезпечення мобільності й конфіденційності.

Проведений аналіз сучасних наукових джерел (2021–2025 рр.) підтвердив, що кожен із зазначених компонентів окремо демонструє високу результатив-

ність у вирішенні специфічних проблем IoT, проте їх поєднання в єдину адаптивну багаторівневу архітектуру дає синергетичний ефект.

Запропонований метод забезпечує значне підвищення продуктивності систем publish-subscribe завдяки проактивній кластеризації брокерів на периферії мережі, використанню інтелектуального веб-шлюзу для міжсистемної взаємодії, впровадженню компактної бінарної структури повідомлень та механізмам підтримки мобільності вузлів. Така інтеграція дозволяє забезпечити низьку латентність обміну даними, підвищену масштабованість, зменшення енергоспоживання та стійкість до збоїв, що є критично важливим для інтелектуального інформування в сучасних IoT-додатках. Таким чином, запропонований метод пропонує цілісний підхід до оптимізації publish-subscribe архітектур, який усуває обмеження існуючих рішень, що зазвичай орієнтуються на ізольовані аспекти проблеми. Отримані результати свідчать про можливість практичного розгортання описаної гібридної моделі на стандартних апаратних платформах, що відкриває перспективи її подальшого застосування у сфері розумних міст, промислових IoT-рішень та інтелектуальних систем моніторингу.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з реалізацією працездатного прототипу системи та проведенням розгорнутих експериментальних випробувань.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи..

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Pham, V.-N., Hossain, M., Lee, G.-W., & Huh, E.-N. (2023), "Efficient Data Delivery Scheme for Large-Scale Microservices in Distributed Cloud Environment". *Applied Sciences*, Vol. 13, No. 2, P. 886. <https://doi.org/10.3390/app13020886>
2. Pham, V.-N., Lee, G.-W., Nguyen, V., & Huh, E.-N. (2021), "Efficient Solution for Large-Scale IoT Applications with Proactive Edge-Cloud Publish/Subscribe Brokers Clustering". *Sensors*, Vol. 21, No. 24, P. 8232. <https://doi.org/10.3390/s21248232>
3. Roffia, L., Morandi, F., Kiljander, J., D'Elia, A., Vergari, F., Viola, F., Bononi, L., & Cinotti, T. S. (2016), "A Semantic Publish-Subscribe Architecture for the Internet of Things". *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 3, No. 6, P. 1274-1296. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2587380>
4. Chen, F., Liu, P., Zhu, J.-M., Gao, S., Zhang, Y., Duan, M., Wang, Y.-W., & Hwang, K. (2020), "Improving Topic-Based Data Exchanges among IoT Devices". *Security and Communication Networks*, Vol. Article ID 8884924. <https://doi.org/10.1155/2020/8884924>
5. Ferraz Junior, N., Silva, A. A. A., Guelfi, A., & Kofuji, S. (2022), "Performance evaluation of publish-subscribe systems in IoT using energy-efficient and context-aware secure messages". *Journal of Cloud Computing*, Vol. 11, No. 1. <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00278-6>
6. Lv, P., Wang, L., Zhu, H., Deng, W., & Gu, L. (2019), "An IOT-Oriented Privacy-Preserving Publish/Subscribe Model Over Blockchains". *IEEE Access*, Vol. 7, P. 41381-41395. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2907599>
7. Hernandez, D., Gameiro, L., Senna, C. R., Luis, M., & Sargento, S. (2022), "Handling Producer and Consumer Mobility in IoT Publish-Subscribe Named Data Networks". *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 9, No. 11, P. 8080-8094. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3069054>
8. Montori, F., Gigli, L., Sciallo, L., & Felice, M. D. (2022), "LA-MQTT: Location-aware Publish-subscribe Communications for the Internet of Things". *ACM Transactions on Internet of Things*, Vol. 3, No. 3, P. 1-28. <http://doi.org/10.1145/3529978>
9. Tanaka, T., Kamada, T., & Ohta, C. (2021), "Topic allocation method on edge servers for latency-sensitive notification service". *International Journal of Network Management*, Vol. 31, No. 6, e2173. <https://doi.org/10.1002/nem.2173>

10. Kotian, S., Elzein, Y., Dominguez, A., Lim, J. S., Amini, N., & Kaur, M. (2025), "A Hybrid Pub/Sub and REST-Based Communication Strategy for Intelligent IoT System Interoperability". *2025 IEEE 22nd Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. <https://doi.org/10.1109/CCNC54725.2025.10975955>
11. Guerrero-Pérez, A. D. (2018), "Resource Management of IoT Devices in Restrictive Environments". *Proceedings of the 1st ACM Workshop on Emerging Smart Technologies and Infrastructures for Smart Mobility and Sustainability (SMARTS)*, P. 13-18, 2019. <https://doi.org/10.1145/3349622.3355451>
12. Siegemund, G., & Turau, V. "A Self-Stabilizing Publish/Subscribe Middleware for IoT Applications". *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, Vol. 3, No. 1, P. 1-27. <https://doi.org/10.1145/3185509>
13. El-Hassan, F. T., & Ionescu, D. (2018), "Design and Implementation of a Hardware Versatile Publish-Subscribe Architecture for the Internet of Things". *IEEE Access*, Vol. 6, P. 34963-34981. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2842706>
14. Єрошенко, О.А., Ціпковський, В.О. (2025), "Порівняльний аналіз методів реального часу для розпізнавання жестів на основі Mediapipe, OpenCV та YOLOv8". *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, Т. 4, No 82, P. 62-65.
15. Sun, X., & Ansari, N. (2018), "Dynamic Resource Caching in the IoT Application Layer for Smart Cities". *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 5, No. 5, P. 6060-6071. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2764418>

Received (Надійшла) 30.10.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

- Єрошенко Ольга Артурівна** – доктор філософії, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Yeroshenko Olha – PhD, Associate Professor of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: 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>.
- Піняєв Євгеній Володимирович** – здобувач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Piniaiev Yevhenii – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: yevhenii.piniaiev@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0003-6489-7240>.
- Пивоварова Дар'я Ігорівна** – асистент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Pyvovarova Daria – Assistant of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: daria.pyvovarova@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-7251-994X>;
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216300264>.
- Кравченко Павло Олександрович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри ЕОМ, Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна;
Pavlo Kravchenko – PhD, Senior Lecturer of the Department of electronic computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: 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>.

Method for optimizing publish-subscribe architectures for intelligent notification under resource-constrained IoT conditions

Olha Yeroshenko, Yevhenii Piniaiev, Daria Pyvovarova, Pavlo Kravchenko

Abstract. The **subject** of the study is methods for optimizing publish–subscribe (pub/sub) architectures for Internet of Things (IoT) systems operating under limited resources, aimed at improving the efficiency of intelligent notification within critical infrastructure and smart environments. The **purpose** of the work is to develop a comprehensive method for optimizing pub/sub architectures by integrating edge computing, hybrid communication models, energy-efficient message structures, and mechanisms for ensuring mobility and privacy. The article addresses the following **tasks**: analysis of the impact of limited hardware resources and network instability on the performance of pub/sub systems; development of an approach to proactive clustering of brokers at the network edge; construction of a hybrid interaction mechanism combining pub/sub and REST communications; optimization of message structures to reduce energy consumption; and ensuring node mobility and spatial privacy. The following **methods** are used: hierarchical IoT architecture modeling (Device–Edge–Cloud), clustering algorithms, binary message encoding, AI/ML-based analysis on gateway nodes, as well as simulation of network and workload characteristics. The **results** obtained include: a proposed multi-level architecture with Edge clustering and an intelligent web gateway that reduces latency, increases scalability, and decreases energy consumption; demonstrated effectiveness of the optimized pub/sub message structures and mobility support mechanisms in dynamic scenarios; and confirmed performance improvements based on simulation results (2021–2025). **Conclusions:** The developed method for optimizing pub/sub architectures shows that the integration of Edge clustering, hybrid communication, energy-efficient message structures, and privacy mechanisms significantly reduces latency and resource consumption in IoT systems, ensuring their resilience and suitability for real deployment in critical and scalable IoT environments.

Keywords: IoT, publish-subscribe, architecture optimization, limited resources, intelligent notification, energy efficiency, edge computing.

Я. С. Зарічний

Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна

РЕКОМЕНДАЦІЯ СЕРВІСУ НА ОСНОВІ ГІБРИДНОЇ МОДЕЛІ СЕМАНТИЧНОГО ПОШУКУ

Анотація. У статті розглянуто проблему рекомендації веб-сервісів у сервіс-орієнтованих системах. Проаналізовано обмеження традиційних методів пошуку на основі ключових слів, зокрема проблему лексичного розриву та відсутність семантичного розуміння контексту запитів. Запропоновано гібридний підхід, що поєднує статистичний метод TF-IDF для лексичного аналізу з нейромережевою моделлю Universal Sentence Encoder для семантичного аналізу тексту. Такий підхід дозволяє враховувати як точні збіги термінів, так і смислову близькість між запитом користувачів та описами сервісів. Розроблено формулу комбінованого обчислення релевантності з параметром балансу між лексичною та семантичною складовими. Проведено експериментальну оцінку на датасеті веб-сервісів з використанням стандартних метрик інформаційного пошуку. **Результати** показали, що гібридний підхід забезпечує суттєве покращення якості рекомендацій порівняно з базовими методами. Отримані значення наведено у таблицях та на графіках. Отримано числові значення, що наведено у таблицях та на графіку. Отримано числові значення, що наведено у таблицях та на графіку. Визначено напрямки подальших досліджень, включаючи персоналізацію рекомендацій та інтеграцію нефункціональних характеристик сервісів.

Ключові слова: сервіс-орієнтована архітектура, семантичний пошук, гібридний пошук, рекомендаційні системи, брокер сервісів, нейронні мережі, машинне навчання.

Вступ

Сервіс-орієнтована система (СОС) є розподіленою обчислювальною архітектурою, що забезпечує взаємодію між трьома ключовими учасниками: замовниками сервісів, брокерами та виконавцями (постачальниками) сервісів [1]. Замовник формулює запит на виконання певної бізнес-задачі, виконавець надає відповідний сервіс, а брокер виступає посередником, який забезпечує пошук, відбір та рекомендацію найбільш релевантних сервісів для задоволення потреб замовника.

Концепція сервіс-орієнтованої архітектури (SOA) виникла як відповідь на потребу в гнучких, масштабованих та інтегрованих програмних системах. У традиційних монолітних архітектурах зміна одного компонента часто вимагала модифікації всієї системи, що призводило до значних витрат часу та ресурсів. SOA пропонує альтернативний підхід, де функціональність системи розподіляється між незалежними сервісами, кожен з яких може бути розроблений, розгорнутий та оновлений окремо [1].

Брокер у СОС виконує критично важливу функцію інтелектуального пошуку сервісів. На відміну від класичного інформаційного пошуку в неструктурованих текстових даних, задача брокера є значно ширшою та складнішою. Брокер може зберігати в локальному архіві (реєстрі) інформацію про вже відомі сервіси та їх характеристики, що дозволяє швидко реагувати на запити замовників без необхідності кожного разу здійснювати пошук у зовнішній мережі. [2] Лише у випадку, коли в архіві немає підходящих пропозицій, брокер ініціює широкий пошук серед зовнішніх постачальників. [3]

Сучасні СОС характеризуються надзвичайно динамічним середовищем: сервіси постійно додаються, оновлюються або стають тимчасово недоступними. За даними досліджень, кількість публічно доступних веб-сервісів та API зростає експоненційно, що створює все складніші вимоги до

механізмів їх пошуку та рекомендації [4]. У таких умовах ефективний пошук релевантних сервісів стає критичним фактором успіху для бізнес-процесів, що залежать від інтеграції зовнішніх послуг. [5]

Дане дослідження зосереджене на розробці інтелектуального механізму пошуку сервісів для брокера СОС із використанням методів семантичного аналізу. Запропонований підхід поєднує традиційні статистичні методи обробки тексту з сучасними моделями глибокого навчання для досягнення високої точності рекомендацій [6]. Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що комбінування лексичного та семантичного підходів дозволить подолати обмеження кожного з методів окремо та забезпечити суттєве покращення якості пошуку.

Постановка проблеми. Традиційні методи [7] пошуку сервісів у сервіс-орієнтованих системах переважно базуються на точному співставленні ключових слів запиту з описами сервісів у реєстрі. Такий підхід, хоча й простий у реалізації, має ряд суттєвих обмежень, що негативно впливають на якість рекомендацій. [8] Одним з найбільш критичних обмежень є нездатність враховувати синоніми та семантичні зв'язки між термінами. Наприклад, запит «аналіз фінансових транзакцій» може не знайти сервіс з описом «моніторинг банківських операцій», хоча функціонально вони є близькими. Ця проблема особливо актуальна в доменах з багатою термінологією, де одні й ті ж концепції можуть описуватись різними словами. Традиційні методи не здатні зрозуміти контекст запиту користувача. Слово «ключ» може означати як предмет для замикання, музичний знак або інструмент, і лише контекст дозволяє визначити правильне значення. Системи, що базуються на ключових словах, не мають механізмів для такого розрізнення. [9] Користувач повинен знати точну термінологію, яка використовується в описах сервісів. Це створює значний бар'єр для користувачів, які не є експертами в конкретній предметній області або використовують нестандартну термінологію.

Основний матеріал

На відміну від класичного інформаційного пошуку документів, пошук сервісів у СОС має ряд специфічних особливостей. Сервіси зазвичай описуються за допомогою структурованих метаданих, що включають назву, текстовий опис, категорію, теги, специфікації вводу/виводу, технічні характеристики та вимоги до безпеки. [10] Ефективний пошук повинен враховувати всі ці аспекти. Сервіси можуть з'являтися, змінюватися або ставати недоступними в будь-який момент. Система пошуку повинна адаптуватися до цих змін та надавати актуальні рекомендації [11]. Один і той самий сервіс може бути релевантним для одного бізнес-процесу і абсолютно непридатним для іншого. Система повинна враховувати контекст, в якому буде використовуватися сервіс.

Формалізація проблеми. Формально задачу рекомендації сервісів можна визначити таким чином:

Нехай $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ – множина доступних сервісів у реєстрі брокера, де кожен сервіс s_i характеризується набором атрибутів $A_i = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$, включаючи текстовий опис d_i . Для заданого запиту користувача q необхідно знайти впорядкований список сервісів $R = [s_{\{i_1\}}, s_{\{i_2\}}, \dots, s_{\{i_m\}}]$, де $m \leq n$, такий що сервіси впорядковані за спаданням релевантності до запиту q . Релевантність визначається функцією $rel(q, s_i)$, яка враховує як семантичну близькість запиту до опису сервісу, так і відповідність нефункціональним вимогам.

Запропоноване рішення. Запропонований підхід базується на гібридній моделі, що поєднує два фундаментально різних методи аналізу тексту для досягнення синергетичного ефекту:

1. Статистичний метод TF-IDF - для точного лексичного співставлення на основі частотних характеристик термінів

2. Нейромережева модель Universal Sentence Encoder (USE) [12] - для семантичного аналізу та виявлення смислових зв'язків

Така комбінація дозволяє подолати обмеження кожного з методів окремо: TF-IDF забезпечує високу точність при наявності спільних термінів, тоді як USE здатна виявляти релевантні сервіси навіть при повній відсутності лексичного перетину між запитом та описом.

Для поєднання переваг обох методів пропонується гібридна формула обчислення релевантності:

$$\text{Score}(q, s) = \alpha \cdot \text{sim}_{\{\text{TF-IDF}\}}(q, d_s) + (1 - \alpha) \times \text{sim}_{\{\text{USE}\}}(q, d_s)$$

де q – запит користувача; s – сервіс з описом d_s ; $\alpha \in [0, 1]$ – параметр балансу між методами.

Інтерпретація параметра α :

- при $\alpha = 0$ – повністю семантичний пошук (тільки USE);
- при $\alpha = 1$ – повністю лексичний пошук (тільки TF-IDF);
- при $\alpha = 0.3$ – переважає семантична складова (70% USE, 30% TF-IDF).

Вибір оптимального значення α є предметом експериментального дослідження та залежить від характеристик конкретного домену та типу запитів.

Запропонована система включає такі етапи обробки (рис. 1):

- препросесинг тексту;
- нормалізація тексту;
- попередня індексація;
- обробка запиту.

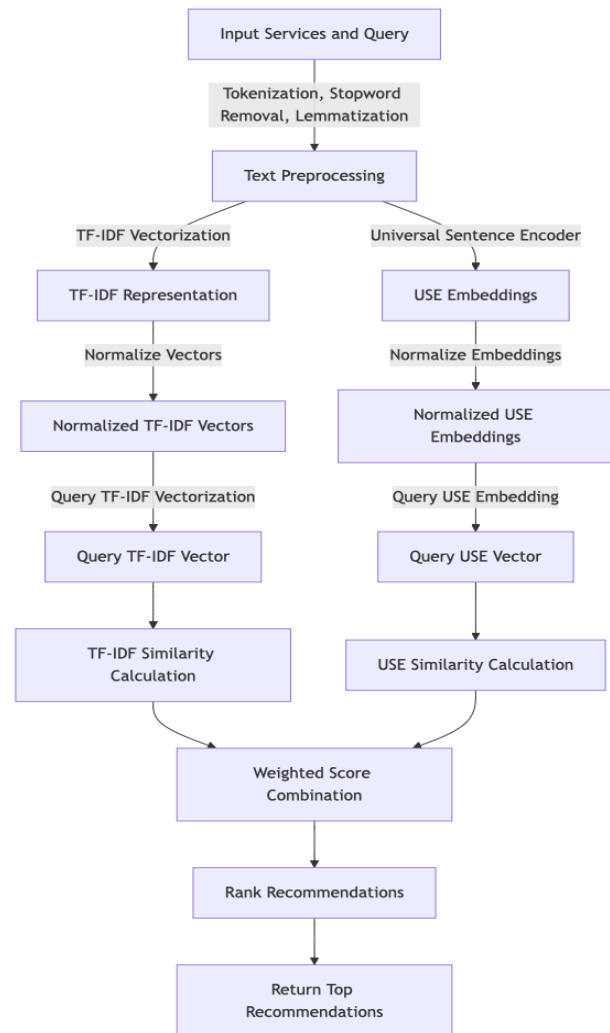


Рис. 1. Алгоритм роботи запропонованого семантичного пошуку

Експерименти. Для оцінки ефективності різних методів пошуку веб-сервісів було створено синтетичний датасет, використовуючи GPT 5.2 модель, що містить 55 веб-сервісів з 10 різних категорій: нерухомість, фінанси, подорожі, їжа, охорона здоров'я, освіта, розваги, електронна комерція, комунікації та аналітика.

Кожен веб-сервіс описаний за допомогою структурованої моделі, що включає:

- базові атрибути: унікальний ідентифікатор, назва, текстовий опис, endpoint URL, версія API;
- категоризація: масив тегів категорій для класифікації сервісу;
- специфікації вводу/виводу: JSON-схеми для опису вхідних параметрів та структури відповіді;
- технічні характеристики: протокол (REST, WebSocket), підтримувані формати даних (JSON, XML, PDF);

- безпека: вимоги до аутентифікації (API Key, OAuth 2.0, JWT, Bearer Token);
- метадані: додаткова інформація про покриття, частоту оновлень, обмеження.

Для тестування було підготовлено 24 пошукових запити природною мовою, розподілених рівномірно між категоріями. Кожен запит містить очікувані релевантні сервіси для обчислення метрик якості. У дослідженні порівнювалися п'ять методів пошуку:

1. Лексичний пошук (Lexical) - базовий метод, що підраховує входження слів запиту в описі сервісу з урахуванням часткових збігів підрядків.

2. TF-IDF пошук - класичний метод інформаційного пошуку, що використовує косинусну подібність між TF-IDF векторами запиту та описів сервісів.

3. Семантичний пошук - використовує Universal Sentence Encoder для отримання 512-вимірних семантичних ембедінгів тексту з подальшим обчисленням косинусної подібності.

4. Гібридний пошук ($\alpha=0.7$) - комбінує семантичний та TF-IDF пошук у перевагу семантичного пошуку.

5. Гібридний пошук ($\alpha=0.5$) - рівномірна комбінація.

Для оцінки якості пошуку використовувалися стандартні метрики інформаційного пошуку:

Precision@K (P@K) - частка релевантних результатів серед топ-K повернутих

Recall@K (R@K) - частка знайдених релевантних сервісів серед усіх релевантних

Mean Reciprocal Rank (MRR) - середнє значення зворотного рангу першого релевантного результату

Mean Average Precision (MAP) - середня точність по всіх релевантних документах

NDCG@K - нормалізований дисконтований кумулятивний вииграш, що враховує позицію релевантних результатів

Аналіз результатів. Експериментальні результати демонструють перевагу гібридного підходу над окремими методами (табл. 1, рис. 2).

Таблиця 1 – Результати проведеного експерименту

Метод	P@1	P@3	P@5	R@5	MRR	MAP	NDCG@5
Lexical	0.792	0.458	0.325	0.826	0.872	0.773	0.798
TF-IDF	0.917	0.444	0.308	0.792	0.930	0.744	0.797
Semantic (USE)	0.875	0.500	0.325	0.872	0.918	0.828	0.855
Hybrid ($\alpha=0.7$)	0.917	0.514	0.358	0.917	0.946	0.850	0.892
Hybrid ($\alpha=0.5$)	0.917	0.486	0.350	0.896	0.944	0.816	0.864

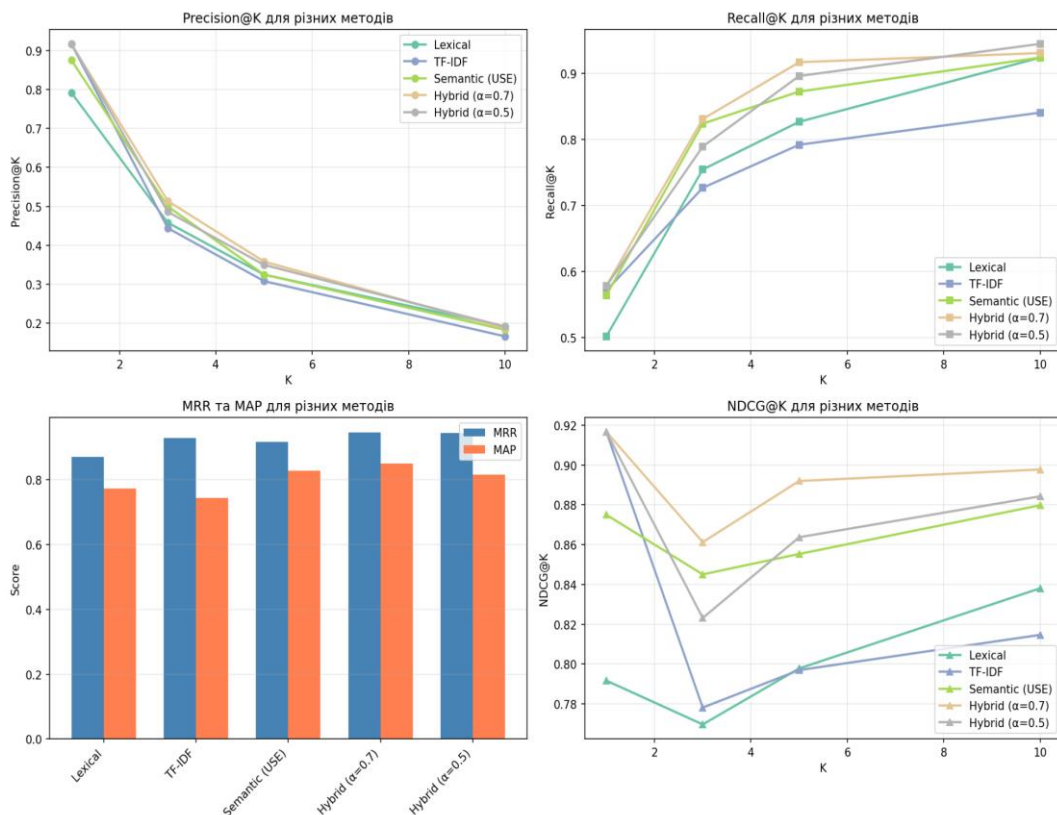


Рис. 2. Графіки основних метрик експерименту

Гібридний пошук ($\alpha=0.7$) досягає найкращих показників за всіма метриками, особливо за Recall@5 (0.917) та NDCG@5 (0.892), що свідчить про

здатність знаходити більше релевантних сервісів та ранжувати їх у правильному порядку. Семантичний пошук перевершує лексичний та TF-IDF методи за

метриками MAP та NDCG, демонструючи здатність розуміти семантичну подібність між запитами та описами сервісів, навіть коли вони не містять спільних слів. TF-IDF показує найвищу точність P@1 серед базових методів (0.917), що робить його ефективним для випадків, коли користувач шукає конкретний сервіс за ключовими словами.

Вага $\alpha=0.7$ виявилася оптимальною, що підтверджує гіпотезу про домінуючу роль семантичного розуміння при пошуку сервісів, з доповненням точного лексичного співставлення для підвищення релевантності

Отримані результати підтверджують ефективність гібридного підходу для рекомендації веб-сервісів, поєднуючи переваги семантичного розуміння контексту з точністю лексичного пошуку.

Підсумки експериментів. Найбільший вигравш від гібридизації спостерігається при порівнянні з TF-IDF: Recall@5 зріс на 15.8% з 0.792 до 0.917; P@5 покращилась на 16.2% з 0.308 до 0.358; MAP збільшився на 14.2% з 0.744 до 0.850. Порівняно з лексичним пошуком, гібридний метод забезпечує покращення P@1 на 15.8% – значно краще знаходить найрелевантніший сервіс; зростання NDCG@5 на 11.8% – краще ранжування результатів.

Семантичний пошук вже є сильним базовим методом, тому приріст від гібридизації менший (2.7-10.2%), але все ще статистично значущий, особливо для P@5 (+10.2%) та R@5 (+5.2%).

Середнє покращення гібридного методу відносно всіх базових методів:

- Lexical: ~11.4% в середньому.
- TF-IDF: ~10.8% в середньому.
- Semantic: ~4.7% в середньому.

Практична інтерпретація результатів. MRR = 0.946 означає, що в середньому перший релевантний сервіс знаходиться на позиції ~1.06 (майже завжди на першому місці).

P@1 = 0.917 – у 91.7% випадків перший результат є релевантним.

R@5 = 0.917 – серед топ-5 результатів знаходиться 91.7% всіх релевантних сервісів.

NDCG@5 = 0.892 – ранжування близьке до ідеального (1.0).

Таким чином, гібридний підхід з вагою $\alpha=0.7$ для семантичної складової забезпечує оптимальний баланс між розумінням контексту запиту та точним лексичним співставленням, що підтверджує доцільність його використання для систем рекомендації веб-сервісів.

Майбутні покращення. Незважаючи на позитивні результати експериментів, існує ряд напрямків для подальшого вдосконалення запропонованого підходу:

Персоналізація рекомендацій. поточна система не враховує індивідуальні особливості користувачів. Майбутні версії можуть включати аналіз історії запитів користувача, врахування прераференцій на основі попередніх взаємодій, колаборативну фільтрацію на основі схожих користувачів, динамічну адаптацію ваги α залежно від профілю користувача.

Динамічна оптимізація ваги α . Замість фіксованого значення α можна розробити автоматичний вибір α на основі характеристик запиту (довжина, наявність специфічних термінів). Машинне навчання для визначення оптимального α на основі зворотного зв'язку. Також, варто враховувати, що різні значення α для різних категорій сервісів також можуть мати позитивні результати.

Інтеграція нефункціональних характеристик. Крім того, пошук релевантного сервісу брокером може здійснюватися не тільки на підставі ключових слів і фраз (як в разі класичного інформаційного пошуку), але й на підставі аналізу даних, які надсилає замовник і які треба обробити сервісом. Таким чином, звертаючи вашу увагу на те, що задача побудови інтелектуального брокера в СОС є ширшою, ніж задача інформаційного пошуку, який здійснюється на підставі аналізу лише семантики запитів. Таким чином формула гібридного пошуку може бути розширена:

$$\text{Score} = \alpha \cdot \text{sim}_{\text{semantic}} + \beta \cdot \text{sim}_{\text{lexical}} + \gamma \cdot \text{quality}_{\text{score}}.$$

Також варто враховувати, що глобалізація ринку сервісів вимагає підтримки різних мов.

Висновки

Семантичний пошук вважається одним з актуальних методів пошуку завдяки його здатності розуміти та інтерпретувати наміри та контекст запитів, пропонуючи значний прогрес у порівнянні з традиційними методами пошуку на основі ключових слів. Незважаючи на такі проблеми, як вимоги до обчислень і потреба в безперервному навчанні, переваги семантичного пошуку є суттєвими, що робить його важливим і передовим компонентом сучасних систем пошуку інформації.

Запропонована модель рекомендацій сервісів у сервісно-орієнтованій архітектурі (SOA) використовує як TF-IDF, так і універсальний кодувальник речень (USE), щоб підвищити точність і релевантність рекомендацій щодо послуг.

Поєднання обох потенційно може дати більш точні рекомендації, враховуючи як частоту термінів, так і їх контекстуальне значення. Таким чином модель виграє від частотної важливості термінів (TF-IDF) і семантичного розуміння тексту (USE), забезпечуючи комплексний підхід до виявлення послуг. Інтеграція USE значно покращує здатність моделі розуміти контекстне значення описів послуг, фіксуючи нюанси зв'язків між послугами, які можуть бути неочевидними лише через частоту ключових слів.

Конфлікт інтересів

Автор декларує, що не має конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автор підтверджує, що не використовував технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Chang E., Dillon T. S., Hussain F. Trust and Reputation for Service Oriented Environments: Technologies for Building Business Intelligence and Consumer Confidence. Chichester : John Wiley & Sons, 2005. 349 p. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470028261>
2. M. Al-Roomi, K. Al-Roomi, S. Alhajri, Design and Implementation of a Framework for Multi-Cloud Service Broker. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2020. URL: https://www.academia.edu/93643567/Design_and_Implementation_of_a_Framework_for_Multi_Cloud_Service_Broker
3. V. Kostetskyi, Brokerage Services as an Element of Modern Logistics Business. Galician Bulletin of TNTU, vol. 92, no. 1, pp. 114-122, 2025. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/48370/2/GEJ_2025v92n1_Kostetskyi_V-Brokerage_services_as_114-122.pdf
4. I. M. S. Bahabry, A new service broker algorithm optimizing the cost and response time for cloud computing. Procedia Computer Science, vol. 151, pp. 419-426, 2019. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919306040>
5. V. Hutsuliak, Brokerage Software Architecture for Improving Efficiency of Service Discovery in Cloud Systems. Electronic Archive of Ternopil National Technical University, 2023. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/43281>
6. V. Hutsuliak, Brokerage Software Architecture for Improving Efficiency of Service Discovery in Cloud Systems. Electronic Archive of Ternopil National Technical University, 2023. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/43281>
7. Собчук О. Ю. Брокерська програмна архітектура для підвищення ефективності використання та вибору хмарних сервісів. Кваліфікаційна робота, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2023. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/43281/1/Mag_2023_SNmz_61_Sobchuk_O_Y_.pdf
8. Bahabry I. M. S. A new service broker algorithm optimizing the cost and response time for cloud computing. Procedia Computer Science, vol. 151, pp. 419-426, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.04.139>
9. Wang L., Zeng Y., Chen L., France R., Xu J., Xu Z. A service concept recommendation system for enhancing the service repository (short paper). Journal of Network and Computer Applications, vol. 35, no. 2, pp. 499-504, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2010.11.010>
10. Захарчук О. В. Метапошукова система для веб-сервісів на основі онтологій. 2022. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37892/1/2022_Zakhar.pdf
11. Петренко О. О. Порівняння типів архітектури систем сервісів. Системні дослідження і інформаційні технології, 2015, № 4, С. 48-62. URL: <http://journal.iasa.kpi.ua/article/view/59442/55314>
12. D. Cer, Y. Yang, S.-Y. Kong, N. Hua, N. Limtiaco, R. St. John, N. Constant, M. Guajardo-Cespedes, S. Yuan, C. Tar, Y.-H. Sung, B. Strope, and R. Kurzweil, "Universal Sentence Encoder," arXiv:1803.11175v2 [cs.CL], Apr. 2018 DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.11175>

Received (Надійшла) 13.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Зарічний Ярослав Сергійович – аспірант кафедри системного проектування, Національного технічного університету «Київський Політехнічний Інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Yaroslav Zarichnyi – PhD student, Department CAD, National Technical University "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Kyiv, Ukraine;

e-mail: varik120700@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-7596-5857>.

Service recommendation based on a hybrid semantic search model

Yaroslav Zarichnyi

Abstract. The article addresses the problem of web service recommendation in service-oriented systems. The broker in such systems plays a critical role in intelligent service discovery, maintaining a registry of available services to efficiently respond to consumer requests. The limitations of traditional keyword-based search methods are analyzed, particularly the lexical gap problem and the lack of semantic understanding of query context. Traditional approaches fail to recognize synonyms and semantic relationships between terms, requiring exact terminology matching. A hybrid approach is proposed that combines the statistical TF-IDF method for lexical analysis with the Universal Sentence Encoder neural network model for semantic text analysis. TF-IDF provides high precision when common terms exist between queries and descriptions, while the Universal Sentence Encoder captures semantic meaning through 512-dimensional vector representations. This approach allows considering both exact term matches and semantic similarity between user queries and service descriptions. A formula for combined relevance computation with a balance parameter between lexical and semantic components is developed. Experimental evaluation was conducted on a web services dataset using standard information retrieval metrics. A formula for combined relevance computation with a balance parameter between lexical and semantic components is developed. Experimental evaluation was conducted on a dataset containing 55 web services and 24 test queries using standard information retrieval metrics. Compared to baseline methods, the hybrid approach provides significant improvement in recommendation quality. The obtained values are presented in tables and graphs. Directions for future research are identified, including recommendation personalization and integration of non-functional service characteristics.

Keywords: service-oriented architecture, semantic search, recommender systems, service broker, neural networks, machine learning.

С. І. Клівець¹, Г. Я. Криховецький², Т. В. Кулешова¹

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

² Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, Київ, Україна

СИНТЕЗ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ КЛАСТЕРА ТУМАННОГО ШАРУ ВИСОКОЩІЛЬНОГО ПРОМИСЛОВОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Анотація. У промислових умовах туманний шар є важливою складовою екосфери Інтернету речей для забезпечення безперервності технологічних процесів та дотримання вимог до надійності й відмовостійкості. Але обмежені ресурси пристроїв туманного шару призводять до зростання затримок обробки, черг, втрати даних або деградації сервісу, особливо при високій щільності туманних пристроїв на обмеженій території. Дані виклики можуть бути суттєво зменшені при формуванні оптимальної мережі зв'язку між туманними пристроями, об'єднаними в єдиний кластер. **Метою** цього дослідження є розробка аналітичного рішення для оптимізації пропускну здатності при передачі даних в туманних IoT мережах з високою щільністю вузлів на базі відповідної математичної моделі процесу обміну даними між шарами IoT.. **Отримані такі результати.** Розроблена математична модель, що визначає характеристики каналів зв'язку між туманними пристроями. Сформульована оптимізаційна задача, що визначає оптимальні значення щільності інформаційного потоку, які мінімізують середню затримку мережі зв'язку з обмеженням за вартістю послуг. Рішення цієї задачі знайдено за допомогою використання невизначених множників Лагранжа. В результаті знайдені значення оптимальних потоків всередині туманного кластера між його пристроями. **Висновки.** Знайдені значення оптимальних потоків всередині туманного кластера між його пристроями, що дозволяє синтезувати оптимальну мережу зв'язку за критерієм мінімізації затримки передачі інформаційних пакетів.

Ключові слова: високощільний промисловий Інтернет речей, туманний шар, обчислювальні ресурси, затримка пакета, черга.

Вступ

Високощільний промисловий Інтернет речей (PoT) характеризується великою кількістю взаємопов'язаних датчиків та виконавчих пристроїв у обмеженому просторі [1]. Наслідком такої топології є значне збільшення обсягу переданої інформації за одиницю часу. Це висуває підвищені вимоги до продуктивності мережевої інфраструктури. Типові промислові сценарії включають дистанційний моніторинг, управління технологічними процесами, передбачуване обслуговування обладнання, а також взаємодію критично важливих систем у реальному часі. Висока щільність пристроїв підсилює конкуренцію за доступ до обмежених ресурсів бездротового середовища, що може призводити до перевантажень і зниження якості зв'язку [2]. Додатково, різні класи трафіку з різними вимогами до затримок і надійності створюють комплексні задачі щодо оптимізації комунікацій.

З огляду на обмежені можливості центральних хмарних ресурсів щодо обробки великих обсягів даних у реальному часі, туманний шар стає ключовим елементом архітектури високощільного промислового IoT. Туман об'єднує пристрої та проміжні обчислювальні вузли, розташовані ближче до джерел даних, що дозволяє виконувати первинну обробку, фільтрацію і агрегацію інформації без передачі у віддалену хмару. Такий підхід зменшує затримки, підвищує реактивність системи та знижує навантаження на канали широкомасштабного зв'язку. Крім того, туманний рівень може здійснювати локальне балансування навантаження і забезпечувати базові механізми безпеки, зокрема автентифікацію та шифрування на периферії мережі. Функції туманного шару також включають підтримку гібридних моделей обробки даних і оптимізацію використання обмежених ресурсів пристроїв. У промислових умовах це є важливим

для забезпечення безперервності технологічних процесів та дотримання вимог до надійності й відмовостійкості. Таким чином, туманний шар є не просто доповненням, а необхідним компонентом для сталого функціонування IoT мереж з високою щільністю вузлів.

Огляд сучасних досліджень. У наукових дослідженнях запропоновано ряд підходів до підвищення ефективності використання каналів зв'язку у туманних IoT мережах. Зокрема, локальна обробка та агрегація даних на периферії дозволяє суттєво зменшити обсяг переданої інформації та навантаження на мережу [3]. Ієрархічні моделі розгортання fog-вузлів забезпечують масштабованість комунікацій та оптимізацію потоків даних у високощільних середовищах [4]. Інтеграція технологій туманних обчислень з IoT інфраструктурою сприяє зниженню затримок і більш ефективному використанню мережевих ресурсів [5]. Поєднання периферійних, туманних і хмарних обчислень формує гнучку архітектуру обробки, що зменшує перевантаження каналів передачі даних [6]. Дослідження методів оптимізації мікропотоків у fog-платформах показують можливість зниження затримок і підвищення ефективності передачі в умовах обмеженої пропускну здатності [7]. Аналіз середовищ туманних обчислень для IoT інфраструктур підтверджує доцільність розподіленої обробки як механізму оптимізації мережевого навантаження [8].

В загальному вигляді задача синтезу ефективної мережі зв'язку туманного шару в умовах обмежених комунікаційних ресурсів не розв'язана, отже є актуальною.

Але у випадку, якщо склад пристроїв окремого кластера туманного шару вже визначений, то оптимальну структуру внутрішньокластерної мережі зв'язку можна синтезувати, використовуючи аналітичне рішення відповідної математичної моделі.

Отже, метою даного дослідження є розробка аналітичного рішення для оптимізації пропускної здатності при передачі даних в туманному шарі екосистеми Інтернету речей з високою щільністю вузлів на базі відповідної математичної моделі процесу обміну даними між шарами IoT.

Результати дослідження

У математичній моделі процесу обміну даними між шарами IoT у якості функції оптимізації використовується середній час підтримки T_{cep} при обмеженні вартості оренди каналів зв'язку $C < C_{max}$.

Використовуючи формулу Літгла отримуємо

$$\gamma T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot T_i, \quad (1)$$

где γ – загальний трафік в мережі; λ_i – інтенсивність потоку пакетів на вході в кожний канал; T_i – середній час затримки пакета в кожній окремій лінії.

Нехай на вхід i -ої черги надходить пуасонівський потік пакетів з інтенсивністю λ_i пакетів в секунду і середнім часом обслуговування μ_i^{-1} с, розподілений за експоненційним законом. Тоді середній час затримки пакета є таким [7]:

$$T_i = \bar{r}_i / \lambda_i + g_i / \mu_i, \quad (2)$$

$$\text{де} \quad g_i = \frac{1 - \rho_i^{m_i+1}}{1 - \rho_i^{m_i+2}} - \quad (3)$$

відносна пропускна здатність;

$$\bar{r}_i = \frac{\rho_i^2 [1 - \rho_i^{m_i} (m_i + 1 - m_i \cdot \rho_i)]}{(1 - \rho_i^{m_i+2}) (1 - \rho_i)} \quad (4)$$

середнє число запитів у черзі; m_i – число місць у черзі; $\rho_i = \lambda_i / \mu_i$.

Підставивши до виразу (2) вирази (3) і (4) та виконавши низку перетворень отримуємо:

$$T_i = \frac{1}{\mu_i} \frac{1 - \rho_i^{m_i+1} [(m_i + 2) - \rho_i (m_i + 1)]}{(1 - \rho_i^{m_i+1}) (1 - \rho_i)}. \quad (5)$$

Однак вираз (5) не зручний для використання в задачі оптимізації через громіздкість. Його легко представити у більш зручній формі:

$$T_i = \frac{1}{\mu_i} \cdot \sum_{k=0}^{m_i} (1+k) \rho_i^k \Big/ \sum_{k=0}^{m_i+1} \rho_i^k = \frac{1}{\mu_i} \frac{S'_{m_i}}{S_{m_i}}, \quad (6)$$

де штрих є похідною по ρ . $\frac{\partial}{\partial \rho}$, а

$$\sum_{k=0}^{m_i+1} \rho^k = \frac{1 - \rho^{m_i+2}}{1 - \rho} = S_{m_i},$$

де S_{m_i} – сума геометричної прогресії.

Тому середній час затримки по всій мережі знаходиться з виразу (1) з урахуванням (6) як

$$T_{cep} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^n \rho_i \frac{\left(\sum_{k=0}^{m_i+1} \rho_i^k \right)}{\sum_{k=0}^{m_i+1} \rho_i^k} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^n \rho_i \frac{S'_{m_i}}{S_{m_i}} \quad (7)$$

Легко показати, що залежність (7) при $m_i \rightarrow \infty$

є формулою $T_{cep} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{1 - \rho_i}$ з необмеженою чергою, а при $m_i = 0$ отримаємо модель мережі у вигляді СМО з відмовами [8]:

$$T_{cep} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{1 + \rho_i}.$$

Функція (7) є опуклою функцією, але не містить екстремумів, тому мінімум середнього часу затримки не може бути знайдений шляхом обчислення часткових похідних по ρ_i .

У зв'язку з цим дана задача є задачею умовної оптимізації. Аналітичне розв'язання поставленої задачі можливе за умови відповідного вибору функції вартості як обмежувальної умови. Числові розрахунки показують, що зазвичай немає великої різниці між випадками використання функцій вартості того чи іншого виду, тобто слід обирати ту функцію вартості, яка найповніше відповідає умовам конкретної задачі. Розглянемо функцію вартості вигляду.

$$C = k \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{V_i}, \quad (8)$$

де при пакетній передачі $F_i = L\lambda_i$, $V_i = L\mu_i$; L – фіксована довжина пакета, тобто

$$C = k \sum_{i=1}^n \rho_i \quad (9)$$

і виражається в одиницях вартості передавання одиниці кількості інформації (тобто щільності потоку інформації, що загалом відповідає прийнятим принципам оплати за використання засобів зв'язку), ρ_i – коефіцієнт використання каналу або завантаження мережі.

Таким чином, оптимізаційна задача може бути сформульована в такому вигляді: визначити оптимальні значення щільності інформаційного потоку, що мінімізують середню затримку:

$$T_{cep} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^n \rho_i \frac{S'_{m_i}}{S_{m_i}} \rightarrow \min. \quad (10)$$

при обмеженні на вартість передачі сумарної кількості інформації, що припадає на одиницю пропускної здатності ліній зв'язку

$$C = k \sum_{i=1}^n \rho_i \leq C_{max}. \quad (11)$$

Для вирішення цього завдання застосовано метод невизначених множників Лагранжа. Складемо функціонал оптимізації:

$$\Phi = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^n \rho_i \frac{S'_{m_i}}{S_{m_i}} + Pk \sum_{i=1}^n \rho_i, \quad (12)$$

де P – невизначений множник Лагранжа.

Розраховуючи часткові похідні $\frac{\partial \Phi}{\partial \rho_i} = 0$, отримаємо систему із n рівнянь такого вигляду:

$$\left(\rho_i \frac{S'_{m_i}}{S_{m_i}} \right)' + \gamma P k = 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (13)$$

Кожне рівняння системи (13) залежить від змінної ρ_i та параметрів m_i, γ, P, k . Якщо $m_i = m$ для всіх вузлів, то $\rho_i = F(m, \gamma, P, k)$, тобто тоді $\rho_i^{onm} = \rho = const$, тобто. оптимальні значення щільностей потоку інформації однакові всім гілкам і залежить від номера гілки зв'язку.

Після диференціювання і низки перетворень отримаємо диференціальні рівняння другого порядку для кожної гілки. Опускаючи індекс i , маємо

$$\frac{S'_m}{S_m} + \rho \frac{S''_m}{S_m} - \rho \frac{(S'_m)^2}{S_m^2} + \gamma P k = 0. \quad (14)$$

Шляхом заміни змінної

$$\frac{S'_m}{S_m} = Z; \quad S''_m = Z' \cdot S_m + Z \cdot S'_m \quad (15)$$

рівняння (14) стає неоднорідним лінійним рівнянням першого порядку

$$Z' + \frac{1}{\rho} Z = -\frac{1}{\rho} \gamma P k. \quad (16)$$

Загальне рішення рівняння (16) знаходиться методом варіації довільної постійної [11]. Відповідне однорідне рівняння

$$Z' + \frac{1}{\rho} Z = 0, \quad (17)$$

із змінними, що розділяються, має загальне рішення в такому вигляді:

$$Z = \frac{C_1(\rho)}{\rho}. \quad (18)$$

Оберемо функцію $C_1(\rho)$ таким чином, щоб вираз (19) задовольняло рівняння (16).

Підставивши (18) в (16) після низки перетворень отримаємо

$$C'_1(\rho) = -\gamma P k. \quad (19)$$

Інтегруючи (19), маємо $C_1(\rho) = -\gamma P k \rho + C_2$, отже

$$Z = -\gamma P k + \frac{C_2}{\rho}. \quad (20)$$

Тоді, повертаючись до реальних змінних, маємо

$$S'_m / S_m = -\gamma P k + (C_2 / \rho). \quad (21)$$

Після інтегрування отримаємо значення змінної

$$S_m = C_3 \rho^{e_2} \cdot e^{-\gamma P k \rho}, \quad (22)$$

де C_3 – постійна інтегрування другої квадратури.

Розв'язуючи задачу Коши при заданих початкових умовах можна отримати значення C_3 . Тоді

$$\rho = C_2 / \left(\gamma P k + (S'_m / S_m) \right). \quad (23)$$

Визначимо значення C_2 із умови $\rho_0 = 1$. Із (7)

$$\left(S'_m / S_m \right)_{\rho=1} = \frac{1+2+\dots+(m+1)}{m+2} = \frac{m+1}{2}, \quad (24)$$

тоді $C_2 = \gamma P k + (m+1)/2$,

$$\rho = \left(\gamma P k + \frac{m+1}{2} \right) / \left(\gamma P k + \left(\frac{S'_m}{S_m} \right) \right). \quad (25)$$

Далі отримаємо значення множника Лагранжа P :

$$P = \frac{(m+1)/2 - (S'_m / S_m) \cdot (C_{зad} / kn)}{\gamma k ((C_{зad} / kn) - 1)}, \quad (26)$$

отже умова екстремумів T_{cep} виразу (7) є такою:

$$(\rho_{onm} - C_{зad} / kn) \left((m+1)/2 - S'_m / S_m \right) = 0. \quad (27)$$

Умови (27) виконуються, якщо

$$\rho_{onm} - C_{max} / kn = 0; \quad S'_m / S_m - (m+1)/2 = 0.$$

Тоді оптимальне значення потоку в гілках

$$\rho_{onm} = C_{зad} / (kn), \quad (28)$$

що забезпечує мінімальне значення середнього часу затримки у мережі зв'язку:

$$T_{cep}^{min} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{C_{зad}}{k} \cdot \left(\frac{S'_m}{S_m} \right)_{onm}, \quad 0 < \rho_{onm} < 1,$$

а максимальне значення затримки в мережі досягається незалежно від вартості мережі при $\rho = 1$:

$$T_{cep}^{max} = (n/\gamma) \cdot (m+1)/2.$$

Висновки та перспективи подальших досліджень

У статті проаналізовані характерні особливості туманного шару високощільного промислового IoT. Розроблена математична модель, що визначає характеристики каналів зв'язку між туманними пристроями. Сформульована оптимізаційна задача, що визначає оптимальні значення щільності інформаційного потоку, які мінімізують середню затримку мережі зв'язку з обмеженням за вартістю послуг. Рішення цієї задачі знайдено за допомогою використання невизначених множників Лагранжа. В результаті знайдені значення оптимальних потоків всередині туманного кластера між його пристроями. Знайдені значення оптимальних потоків всередині туманного кластера між його пристроями, що дозволяє синте-

зувати оптимальну мережу зв'язку за критерієм мінімізації затримки передачі інформаційних пакетів.

Напрями подальших досліджень: синтез між-кластерної мережі зв'язку високощільного промислового Інтернету речей.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі

фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи..

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Клівець С. І., Кулешов О. В., Кулешова Т. В. (2025), "Адаптивний метод динамічного керування ресурсами граничного шару індустріального Інтернету речей", *Системи управління, навігації та зв'язку*, № 4, С. 88–91, doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2026.1.70-73>
2. Zamzam, M., Elshabrawy, T. & Ashour, M. (2019) *Resource management using machine learning in mobile edge computing: A survey*. In: Proceedings of the 2019 Ninth International Conference on Intelligent Computing and Information Systems (ICICIS). DOI: <https://doi.org/10.1109/ICICIS46948.2019.9014733>
3. Qayyum, T., Trabelsi, Z., Malik, A. W. & Hayawi, K., 2022, Mobility-aware hierarchical fog computing framework for Industrial Internet of Things, *Journal of Cloud Computing*, 11(1), 72, doi: <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00345-y>
4. Kasumov, V. A., Amashov, Y. A. & Ismailov, J. M., 2023, Integration of technologies of Internet of Things and fog computing, *Problems of Informatization and Management*, 65, doi: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.65.15367>
5. Gasimov, V. A., Aliyeva, Sh. Kh. & Assanova, Zh. S., 2023, Implementation of industrial internet of things technologies using edge, fog, and cloud computing, *Problems of Informatization and Management*, 75, doi: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.75.18012>
6. Rezanov, B. M., 2022, Analysis of methods for reducing microflow latency in IoT support systems on fog platforms, *Control, Navigation and Communication Systems*, 3, 88, doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.3.088>
7. Cvirkun, L. & Sobolevskiy, I., 2025, Analysis of fog computing environments for building IoT infrastructure, *Inf. Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, pp. 31–36, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2025-1-31>
8. Zhang, X., Wang, X., Xu, X. & Duan, L. (2023) *Resource Management in Mobile Edge Computing: A Comprehensive Survey*. ACM (survey). DOI: <https://doi.org/10.1145/3589639>

Received (Надійшла) 29.10.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Клівець Сергій Іванович – кандидат технічних наук, науковий співробітник наукового центру, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Sergii Klivets – Candidate of Technical Sciences, Researcher at the research center, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: 1546.hnups@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-8109-0639>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58983477300>.

Криховецький Георгій Яремович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, Київ, Україна;

Heorhii Krykhovetskyi – Cand. of Techn. Sc., Senior Researcher, Defence Intelligence Research Institute, Kyiv, Ukraine;

e-mail: kgeorg@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2981-7810>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58697828100&origin=resultslist>.

Кулешова Тетяна Василівна – науковий співробітник наукового центру, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Tetiana Kulieshova – Researcher of the Scientific Center, I. Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: kuletati@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-7404-109X>.

Synthesis of the communication network of a fog-layer cluster in the high-density the Industrial Internet of Things

Sergii Klivets, Heorhii Krykhovetskyi, Tetiana Kulieshova

Abstract. In industrial environments, the fog layer is an important component of the Internet of Things ecosystem, ensuring the continuity of technological processes and compliance with reliability and fault-tolerance requirements. However, the limited resources of fog-layer devices lead to increased processing delays, queue buildup, data loss, or service degradation, especially with a high density of fog devices within a confined area. These challenges can be significantly reduced by forming an optimal communication network among fog devices combined into a single cluster. **The purpose of this study** is to develop an analytical solution for optimizing throughput in data transmission within fog IoT networks with a high density of nodes, based on an appropriate mathematical model of the data exchange process between IoT layers. **The following results** were obtained: a mathematical model was developed that determines the characteristics of communication channels between fog devices; an optimization problem was formulated to determine the optimal values of information flow density that minimize the average network delay under a service cost constraint; the solution to this problem was obtained using the method of Lagrange multipliers. As a result, the optimal flow values within the fog cluster between its devices were determined. **Conclusions.** The obtained optimal flow values within the fog cluster between its devices make it possible to synthesize an optimal communication network according to the criterion of minimizing information packet transmission delay.

Keywords: High-density Industrial Internet of Things, fog layer, computing resources, packet delay, queue.

В. В. Олейнічук¹, О. А. Янковський², І. В. Ільїна²

¹ Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків, Україна

² Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН ЩІЛЬНОСТІ КІСТКОВОЇ ТКАНИНИ

Анотація. **Актуальність.** Рання діагностика змін щільності кісткової тканини є важливою складовою профілактики та лікування захворювань опорно-рухового апарату, зокрема остеопорозу та запальних процесів у пародонті. Традиційні методи оцінювання щільності кісткової тканини часто пов'язані з використанням іонізуючого випромінювання, високою вартістю обладнання та обмеженою доступністю, що ускладнює їх застосування в умовах сільської місцевості та мобільної медицини. **Об'єкт дослідження:** процеси поширення ультразвукових коливань у кістковій тканині. **Мета статті:** розробка мікроконтролерної системи для попереднього оцінювання змін щільності кісткової тканини на основі аналізу часу затримки проходження ультразвукового сигналу. **Результати дослідження.** У статті запропоновано експериментальну мікроконтролерну систему ультразвукової денситометрії, яка дозволяє здійснювати неінвазивний попередній аналіз стану кісткової тканини без використання рентгенологічних методів. Система забезпечує вимірювання часу затримки ультразвукового сигналу та відображення результатів у реальному часі, характеризується низьким енергоспоживанням і можливістю автономної роботи від малогабаритного джерела живлення. **Висновки.** Запропонована система підтверджує доцільність використання ультразвукових методів для попередньої оцінки щільності кісткової тканини та має перспективи подальшого вдосконалення за рахунок підвищення робочої частоти, амплітуди сигналів і оптимізації алгоритмів обробки даних. **Сфера використання отриманих результатів:** мобільні та стаціонарні системи первинної діагностики стану кісткової тканини, зокрема в умовах обмеженої медичної інфраструктури.

Ключові слова: щільність кісткової тканини; ультразвукова денситометрія; мікроконтролерна система; неінвазивна діагностика; час затримки сигналу; біомедичні вимірювання.

Вступ

Постановка проблеми. Пародонтит хронічне запальне захворювання опорного апарату зуба залишається однією з основних причин передчасної втрати зубів. Ключова особливість цієї патології - безсимптомний перебіг на ранніх стадіях, що значно ускладнює діагностику та своєчасне лікування. Тому, сучасна пародонтологія використовує комплексну оцінку клінічних, рентгенологічних та лабораторних показників для визначення ступеню резорбції альвеолярної кістки.

Водночас клінічні методи дослідження мають низку недоліків. Так для визначення глибини пародонтальних кишень притаманна значна між- та внутрішньо експертна варіабельність, яка залежить від сили тиску на зонд, гістологічної морфології ясен, архітекtonіки та геометрії пародонтальної кишені. Рентгенологічні методи, включно з конусно-променевою комп'ютерною томографією, пов'язані з значним іонізуючим променевим навантаженням і не завжди забезпечують достатню інформативність щодо стану тканин пародонта та ранніх запальних змін.

У зв'язку з цим актуальним є пошук нових неінвазивних, доступних та об'єктивних методів діагностики, які могли б доповнити існуючий діагностичний арсенал. Одним з перспективних напрямків цього пошуку, на наш погляд, є акустична діагностика. Метод базується на аналізі звукового відгуку біологічних тканин на зовнішній механічний вплив і дозволяє отримувати інформацію про їх структурно-механічні властивості. В стоматології вже застосовуються такі методи, як кількісна перкусійна діагностика та резонансно-частотний аналіз, які використовуються переважно для оцінки стабільності дентальних імплантатів, проте вони потребують спеціалізованого

обладнання та мають обмежену доступність. Патологічні запальні зміни в тканинах пародонта, зокрема резорбція кісткової тканини, деструкція лігаментарного апарату, та пов'язана з ними прогресуюча рухомість зубів, повинні супроводжуватися зміною параметрів акустичного відгуку, зокрема його спектральних та часових характеристик. Це створює передумови для використання аналізу акустичних ефектів як додаткового інструмента оцінювання стану альвеолярної кістки при патології пародонту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження змін щільності кісткової тканини є важливим напрямом сучасної медичної та біомедичної інженерії, оскільки порушення мінерального обміну кісткової тканини, безпосередньо пов'язане з розвитком остеопорозу, підвищеним ризиком переломів і як наслідок - зниженням якості життя пацієнтів. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, остеопороз належить до найпоширеніших метаболічних захворювань кісткової тканини, особливо серед людей похилого віку та жінок у постменопаузальний період [1]. Тому пошук ефективних, доступних і безпечних методів моніторингу порушення щільності кісткової тканини є актуальним.

На сьогодні «золотим стандартом» вимірювання мінеральної щільності кісткової тканини вважається двоенергетична рентгівівська абсорбціометрія (DXA). Цей метод забезпечує високу точність, відтворюваність результатів і широко використовується в клінічній діагностиці остеопорозу та прогнозування ризику переломів [2]. Міжнародне товариство клінічної денситометрії (ISCD) визначає DXA як основний інструмент для кількісної оцінки BMD та формування T- і Z-критеріїв [3]. Водночас численні наукові публікації вказують на обмеження DXA, зокрема високу вартість обладнання, стаціонарність системи, необхідність

спеціально навченого персоналу та використання іонізуючого випромінювання, що обмежує можливість частого або масового скринінгу [4]. У зв'язку з чим, активно досліджуються альтернативні методи оцінки стану кісткової тканини. Серед них значну увагу приділено кількісній комп'ютерній томографії (QCT), яка дозволяє отримувати об'ємні дані та окремо аналізувати стан кортикальних та трабекулярних складових кісткової тканини. Однак QCT супроводжується ще більшим променевим навантаженням і вищими витратами порівняно з DXA, що також обмежує її широке застосування [5].

Перспективним напрямом для створення портативних і недорогих систем є кількісна ультразвукова денситометрія (QUS). На відміну від DXA, ультразвукові методи не використовують іонізуючого випромінювання, що дозволяє проводити вимірювання в необмеженій кількості [6]. Дослідження показують, що параметри проходження ультразвукових хвиль через кісткову тканину корелюють з її механічними властивостями та мінеральною щільністю, особливо при дослідженні периферійних кісток, зокрема п'яtkової [7]. Проте автори зазначають, що результати QUS суттєво залежать від частоти сигналу, геометрії датчиків, алгоритмів обробки та стабільності умов вимірювання [8].

Останніми роками в наукових роботах дедалі більше уваги приділяється застосуванню мікроконтролерних систем у біомедичних вимірюваннях. Мікроконтролери забезпечують гнучкість, компактність, низьке енергоспоживання та можливість інтеграції датчиків, засобів обробки сигналів і бездротової передачі даних в одному пристрої [9]. У літературі описано приклади використання мікроконтролерів для ультразвукових, імпедансних та вібраційних методів оцінки властивостей кісткової тканини, що відкриває можливості для створення мобільних систем моніторингу [10].

Таким чином, аналіз наукових джерел свідчить про актуальність розробки мікроконтролерної системи для дослідження змін щільності кісткової тканини. Поєднання сучасних мікроконтролерів із неіонізуючими методами вимірювання, зокрема ультразвуковими, дозволяє створити доступні, портативні та безпечні пристрої, що можуть доповнювати традиційні клінічні методи та розширювати можливості ранньої діагностики й динамічного спостереження.

Вище наведене зумовило мету даної роботи, а саме - розробку системи визначення змін щільності кісткової тканини альвеолярних відростків щелеп на основі аналізу акустичних ефектів, що виникають при перкусії зубів, з можливістю поєднання цього методу з аналізом фотографічних та рентгенологічних знімків для підвищення інформативності та об'єктивності діагностики.

Основний матеріал

Для оцінки щільності кісткової тканини пропонується експериментальна система, заснована на використанні ультразвукового методу денситометрії. Ультразвуковий підхід дозволяє здійснювати неінвазивний контроль структурно-механічних вла-

стивостей кісткової тканини без застосування іонізуючого випромінювання, що є важливим для багаторазових вимірювань. Структура запропонованої системи представлена на рис. 1. Система включає мікроконтролер, ультразвуковий випромінювач, приймач ультразвукового випромінювання, індикатор для відображення результатів вимірювань, а також джерело живлення. Мікроконтролер забезпечує управління режимами роботи випромінювача і приймача, обробку сигналу і формування вихідних даних, що характеризують стан кісткової тканини.

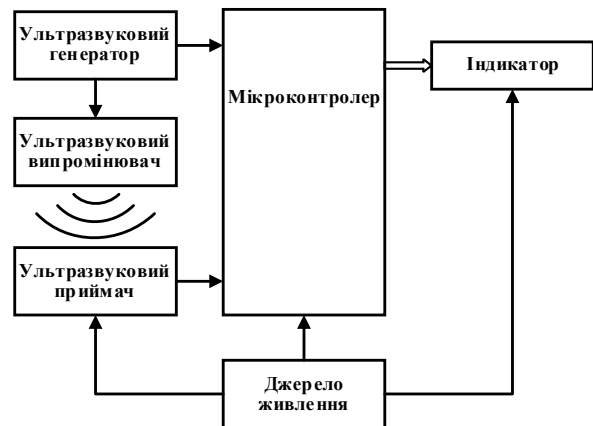


Рис. 1. Структура запропонованої системи

Робота системи здійснюється таким чином. Ультразвуковий випромінювач та ультразвуковий приймач розміщуються по різні боки досліджуваного об'єкта (рис. 2). Випромінювач формує ультразвукові коливання заданої частоти, які проходять крізь кісткову тканину та зазнають ослаблення і фазових змін залежно від її щільності та структурного стану. Приймач ультразвукового сигналу реєструє параметри хвилі, що пройшла через досліджуваний об'єкт. Отриманий сигнал надходить до мікроконтролера, де здійснюється його попередня обробка та аналіз. На основі змін амплітудних і часових характеристик ультразвукового сигналу формується інформативний параметр, який використовується для оцінки щільності кісткової тканини. Результати вимірювань відображаються на індикаторі системи.

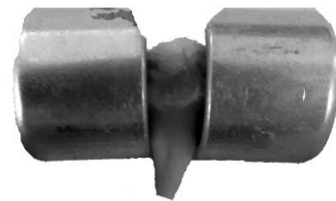


Рис. 2. Приклад розташування ультразвукового випромінювача і приймача

Після активації кнопки «Старт» мікроконтролер формує керувальні імпульси з частотою 40 кГц, які подаються на ультразвуковий випромінювач. У цьому режимі виконується калібрування системи, під час якого на індикаторі відображається час затримки надходження ультразвукового сигналу на приймач.

Величина часу затримки ультразвукового сигналу залежить від акустичних властивостей дослі-

джуваного середовища та, зокрема, від щільності кісткової тканини. Тому на основі отриманих даних можна зробити попередні висновки щодо стану та змін щільності кісткової тканини об'єкта дослідження. Для підвищення достовірності аналізу результатів вимірювань доцільно виконувати порівняльні вимірювання на еталонному об'єкті аналогічного типу та геометричних розмірів, який не має патологічних змін. На рис. 3 наведено сигнали з виходу генератора ультразвукових коливань і з виходу приймача ультразвуку за відсутності об'єкта дослідження, де верхній сигнал відповідає сигналу передавача, а нижній – сигналу приймача.



Рис. 3. Сигнали з виходу генератора ультразвуку і на виході приймача ультразвуку (верхній сигнал – сигнал передавача, нижній сигнал – вихід приймача) при відсутності об'єкта дослідження

На рис. 4 показано відповідні сигнали на входах мікроконтролера після їх перетворення у прямокутну форму. Для отримання наведених осцилограм використовувався цифровий осцилограф Hantek.

Мікроконтролер виконує аналіз часової різниці між моментами надходження імпульсів від генератора ультразвукових коливань і від приймача ультразвуку. Результат вимірювання, виражений у мікросекундах, виводиться на екран індикатора.

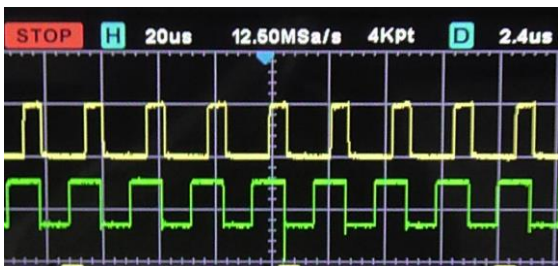


Рис.4. Сигнали на входах мікроконтролера (верхній сигнал – сигнал передавача, нижній сигнал – вихід приймача) за відсутності об'єкта дослідження

Перед проведенням основних вимірювань випромінювач і приймач ультразвукового сигналу розміщуються співвісно один навпроти одного на відстані, що відповідає ширині досліджуваного об'єкта. У цьому режимі на індикаторі відображається час затримки надходження сигналу на приймач, який використовується як еталонне значення.

Після цього випромінювач і приймач розташовуються по різні боки досліджуваного об'єкта, і виконується вимірювання часу проходження ультразвукового сигналу крізь нього у вигляді затримки його надходження на приймач.

Отримані сигнали на входах мікроконтролера та відповідне значення часу затримки відображаються на індикаторі системи. За величиною часу затримки можна зробити попередні висновки щодо щільності кісткової тканини об'єкта дослідження, з урахуванням того, що швидкість поширення ультразвукових хвиль зростає зі збільшенням щільності матеріалу, через який вони проходять. Відповідно, зменшення щільності кісткової тканини призводить до збільшення часу затримки проходження сигналу.

При випробуванні системи було проведено експеримент, щодо обстеження пацієнта для виявлення патології кісткової тканини. Система визначила затримку проходження сигналу під зубами №5 внизу ліворуч і внизу праворуч, оскільки були підозри щодо стану кісткової тканини під таким зубом ліворуч. Під здоровим зубом час затримки склав 3 мкс, а під проблемним зубом 6 мкс. При подальшому обстеженні рентгенівський знімок показав наявність у пацієнта гранульоми під цим зубом.

Висновки

Під час проведення дослідження було запропоновано експериментальну мікроконтролерну систему для оцінювання змін щільності кісткової тканини на основі ультразвукового методу денситометрії. Такий підхід надає змогу здійснювати попередній аналіз стану кісткової тканини без використання рентгенологічних методів дослідження та без залучення коштовного спеціалізованого обладнання.

Система характеризується низьким енергоспоживанням, що дозволяє використовувати малогабаритні акумуляторні джерела живлення та забезпечує можливість автономної роботи. Це робить її особливо актуальною для застосування в умовах обмеженої інфраструктури, зокрема у сільській місцевості, мобільних медичних пунктах і польових умовах. Результати проведених експериментальних досліджень свідчать, що вимірювання часу затримки проходження ультразвукового сигналу крізь об'єкт дає змогу зробити попередні висновки щодо щільності кісткової тканини. Розроблена система є інформативним засобом для експрес-оцінки стану кісткової тканини з відображенням даних у режимі реального часу. Отримані результати підтверджують доцільність подальшого вдосконалення запропонованого методу.

Перспективи удосконалення полягають у розширенні функціональних можливостей за рахунок інтеграції додаткових методів аналізу та підвищення точності вимірювань.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Perez, Mariana Ortega. Osteoporosis and fracture risk assessment: improving outcomes in postmenopausal women [Text] / Perez Mariana Ortega [et al.] // Revista da Associação Médica Brasileira. – 2023. – Volume: 69 Supplement 1. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9282.2023S130>
2. Sangondimath Gururaj. DEXA and Imaging in Osteoporosis [Text] / Gururaj Sangondimath, Ramesh Kumar Sen, Fazal Rehman // Indian Journal of Orthopaedics. 2023. Vol. 57. P. 82–89. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43465-023-01059-2>.
3. Goel, Heenam. Iinical Use of Trabecular Bone Score: The 2023 ISCD Official Positions [Text] / Heenam Goel [et al.] // J Clin Densitom. – 2024. – Vol. 2024 Jan-Mar, 27(1).101452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2023.101452>.
4. Evenepoel, Pieter. "European Consensus Statement on the diagnosis and management of osteoporosis in chronic kidney disease stages G4–G5D [Text] / Pieter Evenepoel [et al.] // Nephrology Dialysis Transplantation. – 2020. – Vol. 36, no. 1. – P. 42–59. DOI: <https://doi.org/10.1093/ndt/gfaa192>.
5. Gazzotti, Silvia. High-resolution peripheral quantitative computed tomography: research or clinical practice? [Text] / Silvia Gazzotti [et al.] // The British Journal of Radiology. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1259/bjr.20221016>.
6. Figueredo, Carlos Alberto. Use of ultrasound imaging for assessment of the periodontium: A systematic review / Carlos Alberto Figueredo [et al.] // Journal of Periodontal Research. – 2023. – P. 3-17. DOI: <https://doi.org/10.1111/jre.13194>.
7. Hans D. Quantitative ultrasound for the detection and management of osteoporosis / Didier Hans, Marc-Antoine Krieg // Salud Pública de México. – 2009. – Vol. 51. – P. 25–37. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0036-36342009000700006>.
8. Bone Quantitative Ultrasound [Electronic resource] / ed. by P. Laugier, G. Haïat. – Dordrecht : Springer Netherlands, 2011. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0017-8>.
9. Webster J.G. Medical Instrumentation: Application and Design. 4th ed., Wiley, 2010., URL: https://toc.library.ethz.ch/objects/pdf/z01_978-0-471-67600-3_01.pdf
10. Pawase, C., D'Souza, S. (2025). Revolutionizing Biomedical Engineering with Microcontroller Applications: A Comprehensive Review. In: Tripathi, A., Soni, A., Tiwari, M., Swarnkar, A., Sahariya, J. (eds) Intelligent Computing Techniques for Smart Energy Systems. ICTSES 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1277. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8429-5_19.

Received (Надійшла) 22.12.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Олейнічук Валерій Вікторович – кандидат медичних наук, доцент кафедри стоматології Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, Харків, Україна.

Valery Oleinichuk – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Stomatology of the Kharkiv National University named after V. N. Karazina, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: v.v.oleinichuk@karazin.ua; ORCID Author ID <https://orcid.org/0000-0002-6690-6986>;

Scopus Author ID <https://www.scopus.com/pages/home?display=basic#basic>.

Янковський Олександр Аркадійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Oleksandr Yankovsky – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: oleksandr.yankovskiy@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1268-0029>.

Ільїна Ірина Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Iryna Ilyna – candidate of technical sciences (Ph.D), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: iryna.ilina@nure.ua; ORCID Author ID <https://orcid.org/0000-0003-3132-7949>;

Scopus Author ID <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202223262>.

Microcontroller-based system for studying changes in bone tissue density

Valery Oleinichuk, Oleksandr Yankovsky, Iryna Ilyna

Abstract. Relevance. Early diagnosis of changes in bone tissue density is an important component of the prevention and treatment of musculoskeletal diseases, particularly osteoporosis and inflammatory processes in the periodontium. Traditional methods for assessing bone density are often associated with the use of ionizing radiation, high equipment costs, and limited availability, which complicates their application in rural areas and mobile medical practice. **Object of study:** processes of ultrasonic wave propagation in bone tissue. **Purpose of the article:** to develop a microcontroller-based system for preliminary assessment of changes in bone tissue density based on the analysis of the time delay of ultrasonic signal propagation. **Research results.** The article proposes an experimental microcontroller-based ultrasonic densitometry system that enables non-invasive preliminary analysis of bone tissue condition without the use of radiographic methods. The system provides measurement of ultrasonic signal delay time and real-time visualization of the results, features low power consumption, and supports autonomous operation powered by a compact energy source. **Conclusions.** The proposed system confirms the feasibility of using ultrasonic methods for preliminary assessment of bone tissue density and demonstrates potential for further improvement through increasing operating frequency, signal amplitude, and optimization of data processing algorithms. **Scope of application of the obtained results:** mobile and stationary systems for primary diagnostics of bone tissue condition, particularly in environments with limited medical infrastructure.

Keywords: bone tissue density; ultrasonic densitometry; microcontroller-based system; non-invasive diagnostics; signal delay time; biomedical measurements.

В. І. Панченко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ УЗАГАЛЬНЕНОГО МЕТОДУ СИНТЕЗУ ТЕСТІВ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ШЛЮЗУ ПЕРИФЕРІЙНОГО ШАРУ ВИСОКОЩІЛЬНОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Анотація. Актуальність. Сучасний розвиток високощільного Інтернету речей (HDIoT) характеризується експоненційним зростанням кількості підключених пристроїв та ускладненням архітектури граничних шлюзів. В умовах гетерогенності протоколів, динамічної зміни топології мережі та обмежених обчислювальних ресурсів традиційні методи діагностики, орієнтовані на статичні структурні моделі, втрачають ефективність. Це зумовлює необхідність розробки нових адаптивних методів синтезу тестів, здатних оперувати у просторах станів великої розмірності та забезпечувати надійність функціонування критичної інфраструктури HDIoT. **Об'єкт дослідження:** процеси діагностики та синтезу тестових наборів для компонентів інтелектуальних шлюзів високощільного Інтернету речей. **Мета статті:** розробка та експериментальне дослідження узагальненого методу синтезу тестів на основі еволюційно-генетичних алгоритмів для забезпечення максимального покриття несправностей при мінімізації часових витрат. **Результати дослідження.** Запропоновано метод синтезу тестів, що дозволяє динамічно змінювати стратегію пошуку залежно від поточної ефективності діагностичного процесу. Розроблено імітаційну модель та проведено експериментальне дослідження. **Висновки.** Розроблено узагальнений адаптивний метод синтезу тестів для діагностики інтелектуального шлюзу периферійного шару, що базується на дворівневій архітектурі «Планувальник–Диспетчер» та математичних моделях генетичних операторів з урахуванням структурної складності об'єкта. Експериментально підтверджено скорочення часу синтезу на 8-15% при забезпеченні покриття 95-98%. Сфера використання отриманих результатів: розробка систем автоматизованої діагностики та вбудованого самотестування для граничних вузлів та шлюзів у промислових та корпоративних мережах IoT.

Ключові слова: автоматизована система генерації тестових наборів; високощільний Інтернет речей; генетичні алгоритми; інтелектуальний шлюз; синтез тестів; тестова діагностика.

Вступ

Постановка проблеми. Стрімка еволюція екосистем Інтернету речей призвела до появи концепції високощільного IoT (High-Density IoT, HDIoT), де щільність пристроїв може сягати тисяч одиниць на квадратний кілометр [1]. У таких мережах інтелектуальний шлюз граничного шару (Intelligent Edge Layer Gateways, IELG) виступає критичним вузлом, що забезпечує агрегацію даних, трансляцію протоколів та виконання локальної аналітики (Edge AI). Складність архітектури IELG [2], яка поєднує різноманітні обчислювальні ядра, спеціалізовані прискорювачі та гетерогенні інтерфейси, створює суттєві виклики для систем технічної діагностики.

Класичні методи генерації тестів (Automatic test pattern generation, ATPG), розроблені для детермінованих цифрових схем, виявляються неефективними для IELG через проблему «вибуху станів» та неможливість адекватного моделювання динамічних процесів у мережевих стеках. Стохастичні методи, зокрема генетичні алгоритми, демонструють кращі результати, проте їхня «сліпа» природа часто призводить до надмірних витрат часу на генерацію тестів, що є неприпустимим в умовах реального часу. Актуальною науковою задачею є створення узагальненого методу, який би поєднував переваги різних підходів та адаптувався до специфіки об'єкта діагностування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням діагностики складних цифрових систем присвячено значну кількість робіт. Фундаментальні підходи, такі як D-алгоритм, PODEM та FAN, та їх сучасні модифікації забезпечують гарантоване виявлення несправностей для комбінаційних схем, але їх

обчислювальна складність зростає за кубічним законом від кількості елементів [3, 4]. Еволюційні методи на базі генетичних алгоритмів [5] дозволяють вирішувати задачі синтезу для послідовнісних схем, розглядаючи процес як задачу оптимізації. Однак, існуючі реалізації [6] часто використовують фіксовані параметри генетичних операторів, що не дозволяє враховувати зміну характеру пошуку на різних етапах синтезу. Відсутність механізмів адаптації призводить до стагнації популяції та зниження ефективності тестування складних вузлів IELG.

Фундаментальна робота [7] класифікує методи тестування, виділяючи гетерогенність протоколів як головний бар'єр. Автори стверджують, що існуючі фреймворки не забезпечують кросрівневого покриття, що підтверджує актуальність розробки узагальнених математичних моделей. Огляд [8] вказує на брак інструментів, здатних динамічно адаптуватися до зміни топології мережі. Дослідження [9] деталізує роль туманного шару, підкреслюючи, що шлюз повинен обробляти дані «на краю» для зменшення латентності. Це висуває вимогу до тестів перевіряти не лише логічну коректність, а й часові параметри виконання.

Робота [10] описує перехід до інтелектуальних екосистем, що вимагає зміни парадигми тестування зі структурної (перевірка з'єднань) на поведінкову (перевірка сценаріїв). У дослідженні [11] розроблено методи моніторингу стану сенсорів й викликаних відмов, з фокусом на практичні сценарії експлуатації промислового IoT (Industrial IoT, IIoT) та висвітлені проблеми автоматичного розпізнавання типів відмов. Дослідження [12] зосереджене на виявленні та класифікації відмов у IIoT-середовищах за умов неповних

(відсутніх) даних сенсорів. Було виявлено головну проблему – у реальних IoT-мережах присутні часті пропуски даних через збої зв'язку чи сенсорні помилки, що ускладнюють діагностику.

Метою роботи є розробка та дослідження узагальненого методу синтезу тестів, який використовує дворівневу модель управління для динамічного вибору стратегії пошуку, що забезпечує підвищення повноти покриття несправностей та скорочення часу діагностики.

Основний матеріал

Для подолання обмежень окремих алгоритмів пропонується узагальнений (комплексний) метод синтезу тестів, який базується на ідеї динамічної реконфігурації обчислювального процесу. Метод розглядається як система, що складається з набору базових алгоритмів («будівельних блоків») та надбудови управління.

Структурно узагальнений метод реалізується через взаємодію двох ключових компонентів: «планувальника» та «диспетчера».

«Планувальник» – інтелектуальний модуль, що відповідає за стратегічне управління процесом синтезу. Його функції включають: аналіз поточного стану процесу (повнота покриття C , час виконання T , швидкість виявлення нових несправностей C/T ; перевірку умов завершення синтезу; прийняття рішення про вибір або зміну методу синтезу (будівельного блоку) для наступної ітерації.

«Диспетчер» – виконавчий модуль, що забезпечує інтерфейс між «планувальником» та конкретними алгоритмами. Він виконує ініціалізацію та налаштування параметрів обраного методу; передачу контексту (поточної популяції тестів, списку виявлених несправностей) між алгоритмами та запуск виконання методу.

Формально процес описується в термінах теорії універсальних алгебр [13]: алгебра A_1 описує генерацію окремих тестових наборів (хромосом), а алгебра A_2 – еволюцію популяції тестів. Планувальник реалізує відображення множини станів процесу на множину доступних алгоритмів.

Алгебра генерації індивідуумів визначається як $A_1(M_1, D_1)$, де $M_1 = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ – множина всіх допустимих тестових наборів (хромосом). Кожен елемент $m_i \in M_1$ являє собою вектор вхідних впливів, що подаються на інтерфейси шлюзу (наприклад, бінарні послідовності, пакети протоколів, аналогові сигнали). Важливою умовою є приналежність кожного згенерованого набору до області допустимих значень, що наближає тестову діагностику до функціональної. $D_1 = \{d_1^{k_1}, d_2^{k_2}, \dots, d_n^{k_n}\}$ – сигнатура операцій;

k_i – арності над хромосомами: d^0 – генерування випадкового тестового набору (ініціалізація); d^1 – мутація, зміна одного або кількох генів у хромосомі

(наприклад, інверсія біта, зміна поля заголовка пакету); d^2 – кросовер (схрещування) — обмін ділянками генетичного коду між двома батьківськими особинами для створення нащадків; d^n – складні види рекомбінації, характерні для еволюційних стратегій.

Алгебра еволюції популяцій визначається як $A_2(M_2, D_2)$, де $M_1 = \{P_1, P_2, \dots\}$ – множина популяцій, де кожна популяція P_i є підмножиною M_1 ; D_2 – сигнатура операцій над популяціями. Сюди входять оператори селекції (вибір батьківських пар), редукції (відсів найменш пристосованих особин), елітаризму (збереження кращих рішень).

Головною особливістю даної моделі є встановлення гомоморфізму між алгебрами класичних генетичних і множиною еволюційних алгоритмів та алгебрами синтезу тестів. Наявність такого гомоморфізму математично гарантує, що властивості збіжності та адаптивності, доведені для алгоритмів моделювання розвитку популяцій, будуть справедливими і для задачі синтезу тестів IELG.

Ефективність методу залежить від алгоритму перемикання стратегій. Пропонується формалізувати чотири основні підходи до роботи «планувальника»:

Стратегія 1: вибір за результатами конкуренції. Процес поділяється на етап розвідки та етап експлуатації. Спочатку всі доступні методи запускаються паралельно (або в режимі розділення часу) на короткий проміжок. Метод, що продемонстрував найкращу динаміку покриття, обирається як основний для подальшого синтезу.

Стратегія 2: вибір за апріорними ознаками. Метод обирається на основі структурних характеристик об'єкта діагностування (кількість входів, глибина схеми, наявність зворотних зв'язків). Наприклад, для схем з великою кількістю входів ($N_{in} > 1000$) пріоритет надається генетичним алгоритмам з високою мутацією.

Стратегія 3: імовірнісний адаптивний відбір. Кожному методу присвоюється ймовірність вибору p_i . Якщо застосування методу i призвело до покращення результату, p_i збільшується, інакше – зменшується. Це реалізує механізм навчання з підкріпленням.

Стратегія 4: випадковий вибір з моніторингом ефективності. Методи обираються випадково, але працюють до моменту падіння їх ефективності нижче порогового значення. Ця стратегія виявилася найбільш стійкою до локальних оптимумів, дозволяючи «виштовхувати» процес пошуку з зон стагнації.

Для підвищення ефективності пошуку в просторі станів IELG розроблено спеціалізовані оператори та метрики.

Фітнес-функція. Запропоновано мультиплікативну модель оцінки пристосованості особини $\mu(a_i^t)$, яка враховує не лише факт покриття несправностей, а й новизну внеску в загальний результат:

$$\mu(a_i^t) = k_N \cdot k_P \cdot k_C,$$

де $k_N = 1 + (N_{ij} - N_j) / N_p$ – коефіцієнт новизни, що стимулює виявлення унікальних несправностей; N_{ij} – кількість несправностей, виявлених сукупністю тестів разом з поточним; N_j – кількість несправностей, виявлених раніше; N_p – загальна кількість можливих несправностей; $k_P = 1 + t / T_m$ – коефіцієнт еволюційного тиску для компенсації зниження темпів пошуку на пізніх етапах; t – номер поточного покоління; T_m – максимальна кількість поколінь; $k_C = N_i / N_p \cdot 100$ – індивідуальна ефективність; N_i – кількість несправностей, виявлених даним набором ізольовано.

Зростання коефіцієнта k_P з часом дозволяє підтримувати високі значення фітнес-функції навіть для тестів з незначним приростом покриття, запобігаючи передчасній зупинці алгоритму.

Адаптивна ймовірність мутації d^1 . Для уникнення руйнування корисних схем на пізніх етапах синтезу запропоновано формулу, що зв'яже ймовірність мутації p_m зі складністю вхідного каскаду шлюзу L_{first} та поточним $\mu(a_i^t)$ і максимально досяжним значенням μ_{max} пристосованості в поточній популяції:

$$p_m(\mu(a_i^t)) = \frac{1}{N_{in} \sqrt{1 + L_{first} / N_{in}}} \cdot \exp\left(-\frac{\mu(a_i^t)}{\mu_{max}}\right).$$

Такий підхід забезпечує високу варіативність на початку пошуку та стабілізацію рішень при наближенні до оптимуму (рис. 1).

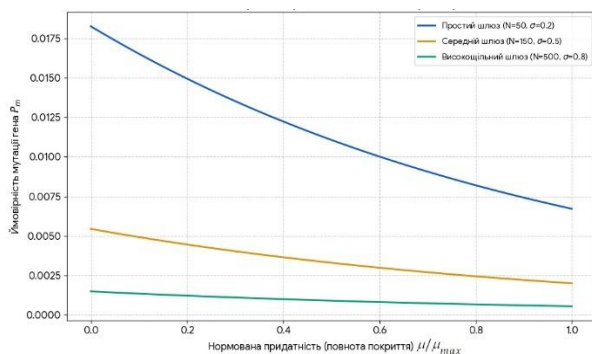


Рис. 1. Залежність ймовірності мутації від ступеню пристосованості

Оператор кросовера d^2 або його можливий варіант d^n ($n > 2$) проводиться над двома чи більшою кількістю хромосом. При цьому хромосоми особин («батьки») не змінюються, а в результаті застосування відбувається створення нової хромосоми – «нащадка», яка додається в популяцію.

У розробці систем тестування шлюзів особлива увага приділяється оператору суміщеного кросовера,

який запобігає стагнації пошуку. Його застосування є критичним при малій чисельності популяції або її високій однорідності, коли зростання середньої пристосованості $\mu_{сер}(t)$ сповільнюється.

Для досягнення максимальної повноти тестування при обмеженому часі використовується «м'яка» схема природного відбору, яка забезпечує спадковість кращих тестових наборів. Репродукційна група включає як батьків, так і нащадків, що гарантує виконання фундаментальної теореми Фішера – середня пристосованість популяції (якість тесту) з кожним поколінням лише зростає.

Для верифікації теоретичних моделей було реалізовано програмний комплекс імітаційного моделювання, побудований на принципах об'єктно-орієнтованого програмування, що містить:

1. Клас «схема» – програмне відображення компонента інтелектуального шлюзу. Він містить повну інформацію про топологію схеми, типи елементів, наявність зворотних зв'язків та елементів пам'яті. Внутрішнє представлення схеми базується на орієнтованому графі, де вершини відповідають логічним компонентам, а дуги – лініям зв'язку.

2. Клас «тестовий набір» – елементарна одиниця діагностичної інформації – вхідний вектор, що подається на входи IELG.

3. Клас «хромосома» – «особина» в популяції. Хромосома містить послідовність тестових наборів (генотип), а також метадані, необхідні для роботи еволюційного алгоритму: значення фітнес-функції, оцінку повноти покриття, довжину тесту та історію походження.

4. Клас «популяція» – моделює сукупність рішень-кандидатів на поточному етапі еволюції, відповідає за зберігання масиву хромосом, обчислення інтегральних характеристик покоління (середня, максимальна та мінімальна пристосованість) та реалізацію механізмів селекції.

5. Клас «алгоритм» – керуючий клас, який реалізує логіку еволюційного пошуку, містить набір методів, що відповідають генетичним операторам: схрещування, мутації, селекції та редукції. Архітектура класу дозволяє динамічно змінювати стратегії пошуку, перемикаючись між різними модифікаціями алгоритмів (класичний ГА, еволюційні стратегії, метод комбінування евристик) у процесі виконання, що є реалізацією концепції «Планувальника» та «Диспетчера».

Результати досліджень

Для кількісної оцінки ефективності запропонованого методу було проведено комплексне експериментальне дослідження з використанням розробленої імітаційної моделі.

Методологія дослідження базувалася на теорії планування активного експерименту. Було обрано план повного факторного експерименту, як фактори впливу розглядалися: об'єм пристрою (кількість елементів, з точністю до яких виконується побудова тесту), довжина тесту (розмір популяції), ймовірність мутації та інтенсивність кросовера.

Функцією відгуку виступав час синтезу тесту до досягнення заданого рівня повноти покриття (95%). Статистична обробка отриманих даних дозволила побудувати поліноміальні регресійні моделі, що описують залежність часу синтезу від досліджуваних факторів та їх взаємодій. Аналіз коефіцієнтів регресії виявив домінуючий вплив фактора складності пристрою, який лінійно збільшує час синтезу. Водночас, було встановлено, що збільшення розміру популяції тестів має зворотний вплив на час виконання, тобто сприяє прискоренню процесу. Було виявлено ефект взаємодії між складністю пристрою та розміром популяції: позитивний ефект від збільшення популяції суттєво посилюється саме для складних об'єктів діагностування. Порівняльний аналіз ефективності різних методів показав (рис. 2), що запропонований комплексний підхід, особливо в режимі адаптивного перемикавання стратегій, забезпечує найкращі показники швидкодії.

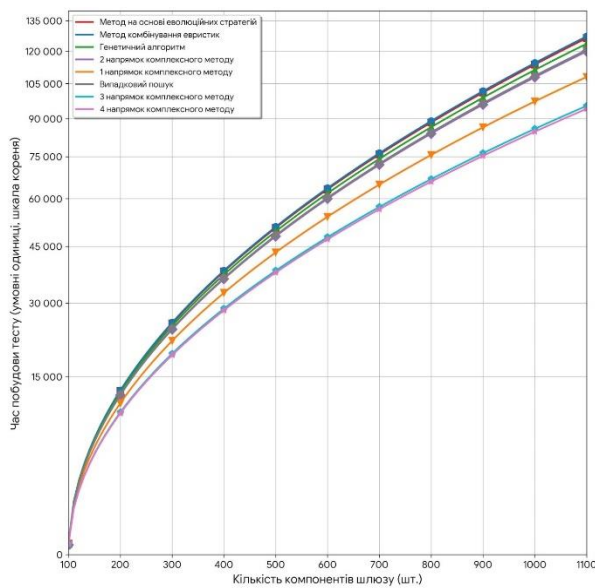


Рис. 2. Залежність часу побудови тесту від кількості компонентів шлюзу

У найбільш складних сценаріях, що характеризуються великою розмірністю схеми та обмеженнями на довжину тесту, розроблений метод дозволив скоротити час синтезу на 8-15% порівняно з класичним генетичним алгоритмом. При цьому метод випадкового пошуку в аналогічних умовах виявився нездатним досягти необхідного рівня покриття, що підтверджує його непридатність для діагностики сучасних інтелектуальних шлюзів. Важливим аспектом ефективності є не лише кінцевий час побудови тесту, але й динаміка досягнення результату, що наведена на рис. 3.

Метод випадкового пошуку характеризується швидким стартом (легкі несправності виявляються миттєво), але дуже швидким виходом на насичення («ефект плато») на рівні 60-70%. Подальший приріст покриття вимагає експоненційного збільшення кількості спроб, оскільки ймовірність випадкової генерації тестів для важкодоступних несправностей є вкрай низькою. Комплексний метод демонструє більш рівномірне зростання. Завдяки механізмам адаптивної мутації та спрямованого кросовера, алгоритм здатен

долати локальні плато. Особливо це помітно на заключних етапах пошуку (покриття > 90%), де комплексний метод продовжує стабільно генерувати нові ефективні вектори, в той час як класичні методи стагнують. Це робить комплексний метод ефективним інструментом для досягнення високих рівнів надійності, необхідних для критичних вузлів IELG.

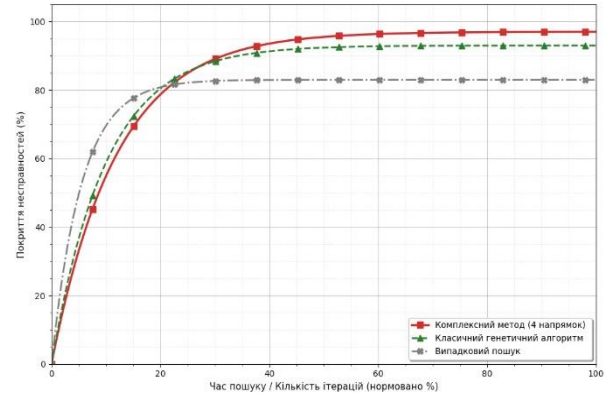


Рис. 3. Усереднена залежність повноти тесту від кількості згенерованих вхідних наборів

Висновки

Розроблено узагальнений метод синтезу тестів для діагностики IELG, який завдяки дворівневій архітектурі управління («Планувальник»-«Диспетчер») забезпечує адаптацію стратегії пошуку до поточних умов діагностики.

Запропоновано математичні моделі адаптивних генетичних операторів, які враховують структурну складність об'єкта діагностування, що дозволяє уникнути стагнації пошукового процесу.

Експериментально доведено, що використання узагальненого методу дозволяє скоротити час синтезу тестів для пристроїв великої складності на 8-15% порівняно з класичними підходами, гарантуючи при цьому повноту покриття на рівні 95-98%.

Встановлено, що збільшення розміру популяції в рамках еволюційного методу сприяє загальному прискоренню процесу синтезу, що спростовує необхідність жорсткої економії пам'яті на етапі генерації тестів. Перспективи подальших досліджень вбачаються в таких напрямках:

- інтеграція розроблених методів з технологією цифрових двійників для предиктивної діагностики шлюзів до їх фізичного розгортання;
- розробка спеціалізованих тестів для виявлення дрейфу моделей машинного навчання та змагальних атак на рівні шлюзу;
- оптимізація тестових процедур за критерієм енергоефективності для подовження часу життя автономних вузлів IoT;
- адаптація методів для тестування смарт-контролів та механізмів консенсусу в децентралізованих мережах.

Використання засобів штучного інтелекту

Автор підтверджує, що не використовував технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Jain, S., Sukul, P., Groppe, J., Warnke, B., Harde, P., Jangid, R., Rehan, W., Cotrado, Y., Fischer, S., & Groppe, S. (2025). A scientometric analysis of reviews on the Internet of Things. *The Journal of Supercomputing*, 81(6), 757. <https://doi.org/10.1007/s11227-025-07230-w>
- Abdelwahed, S. H., Hefny, I. M., Hegazy, M., Said, L. A., & Soltan, A. (2025). Survey of IoT multi-protocol gateways: Architectures, protocols and cybersecurity. *Internet of Things*, 33, 101703. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101703>
- Li, W., Wang, T., & Li, H. (2023). An Automatic Test Pattern Generation Method for Digital Circuits Based on K-Nearest Neighbor. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 35(11), 1802-1810. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1089.2023.20030>
- Dhare, V., & Mehta, U. (2024). Test generation algorithm for QCA circuits targeting novel defects and its corresponding fault models. *Microprocessors and Microsystems*, 110, 105090. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2024.105090>
- Cebeci, C., & Timur, O. (2025). Deterministic Parameter Control Methods for Genetic Algorithms: Benchmarking on Test Functions and Boost Converter Design Optimisation. *Applied Sciences*, 15(20), 11093. <https://doi.org/10.3390/app152011093>
- Rajagopal, M., Sivasakthivel, R., Loganathan, K., & Sarris, L. E. (2023). An Automated Path-Focused Test Case Generation with Dynamic Parameterization Using Adaptive Genetic Algorithm (AGA) for Structural Program Testing. *Information*, 14(3), 166. <https://doi.org/10.3390/info14030166>
- Lima, B., & Pinto, R. (2025). Current Challenges and Future Perspectives in Testing IoT Systems: A Comprehensive Review. *IEEE Sensors Reviews*, 3, 22–47. <https://doi.org/10.1109/SR.2025.3628264>
- Minani, J. B., Sabir, F., Moha, N., & Guéhéneuc, Y.-G. (2024). A Systematic Review of IoT Systems Testing: Objectives, Approaches, Tools, and Challenges. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 50(4), 785–815. <https://doi.org/10.1109/TSE.2024.3363611>
- Bhatia, J., Italiya, K., Jadeja, K., Kumhar, M., Chauhan, U., Tanwar, S., Bhavsar, M., Sharma, R., Manea, D. L., Verdes, M., & Raboaca, M. S. (2022). An Overview of Fog Data Analytics for IoT Applications. *Sensors*, 23(1), 199. <https://doi.org/10.3390/s23010199>
- Shehu Yalli, J., Hilmi Hasan, M., & Abubakar Badawi, A. (2024). Internet of Things (IoT): Origins, Embedded Technologies, Smart Applications, and Its Growth in the Last Decade. *IEEE Access*, 12, 91357–91382. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3418995>
- Garcés-Jiménez, A., Rodrigues, A., Gómez-Pulido, J. M., Raposo, D., Gómez-Pulido, J. A., Silva, J. S., & Boavida, F. (2024). Industrial Internet of Things embedded devices fault detection and classification. A case study. *Internet of Things*, 25, 101042. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.101042>
- Dzaferagic, M., Marchetti, N., & Macaluso, I. (2022). Fault Detection and Classification in Industrial IoT in Case of Missing Sensor Data. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(11), 8892–8900. <https://doi.org/10.1109/IIOT.2021.3116785>
- He, Y., Sun, H., Wang, Y., Zhang, X., & Mirjalili, S. (2023). Set algebra—Based algebraic evolutionary algorithm for binary optimization problems. *Applied Soft Computing*, 143, 110425. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110425>

Received (Надійшла) 14.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

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; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3364-3398>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58759071400>.

Development and research of a generalized method for test synthesis for intelligent high-density IoT edge-layer gateway diagnostics

Volodymyr Panchenko

Abstract. Relevance. The modern development of high-density Internet of Things (HDIoT) systems is characterized by exponential growth in the number of connected devices and increasing architectural complexity of edge gateways. Under conditions of protocol heterogeneity, dynamic network topology changes, and limited computational resources, traditional diagnostic methods based on static structural models lose their effectiveness. This necessitates the development of new adaptive test synthesis methods capable of operating in high-dimensional state spaces and ensuring reliable operation of critical HDIoT infrastructure. **Object of research:** processes of diagnostics and test set synthesis for components of intelligent gateways in high-density IoT environments. **Purpose of the article:** to develop and experimentally investigate a generalized test synthesis method based on evolutionary-genetic algorithms to ensure maximum fault coverage while minimizing time costs. **Research results.** A test synthesis method is proposed that enables dynamic modification of the search strategy depending on the current efficiency of the diagnostic process. A simulation model was developed and an experimental study was conducted. **Conclusions.** A generalized adaptive method for test synthesis for diagnosing an intelligent edge-layer gateway has been developed, based on a two-level “Planner–Dispatcher” architecture and mathematical models of genetic operators that account for the structural complexity of the object. Experimental results confirm a reduction in synthesis time by 8-15% while ensuring 95-98% coverage. Application area: development of automated diagnostic systems and built-in self-test solutions for edge nodes and gateways in industrial and enterprise IoT networks.

Keywords: automatic test pattern generation; intelligent gateway; genetic algorithms; high-density IoT; test diagnostics; test synthesis.

С. С. Пироженко, А. С. Гук

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ПРОЕКТУВАННЯ СТРУКТУРИ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ГЕТЕРОГЕННОГО ВІРТУАЛІЗОВАНОГО ЦЕНТРУ ОБРОБКИ ДАНИХ

Анотація. **Актуальність дослідження.** У реальних умовах експлуатації центри обробки даних формуються на основі різнорідних апаратних платформ, мережових рішень та програмних середовищ, що призводить до появи гетерогенних обчислювальних інфраструктур. Така гетерогенність ускладнює процеси керування ресурсами, балансування навантаження та забезпечення заданого рівня якості обслуговування. **Об'єктом** дослідження є процес обробки даних у гетерогенній віртуалізованій центрі обробки даних як складна багатокомпонентна обчислювальна система, що об'єднує різнорідні апаратні, програмні та мережові ресурси у єдину інфраструктуру. **Предметом** дослідження є методи та засоби імітаційного моделювання процесів функціонування гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних, зокрема моделі взаємодії різнорідних ресурсів, механізми їх віртуалізації та алгоритми розподілу навантаження. **Метою** дослідження є проектування та дослідження структури імітаційної моделі гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних, що дозволяє аналізувати вплив різнорідності обчислювальних, мережових і програмних ресурсів на ефективність функціонування системи, а також оцінювати характеристики продуктивності, масштабованості та керування ресурсами в умовах віртуалізації. **Результати дослідження.** У ході виконання роботи було розроблено структуру імітаційної моделі гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних з урахуванням різнорідності апаратних та програмних ресурсів, обґрунтовано вибір середовища імітаційного моделювання для дослідження процесів функціонування ГВЦОД, реалізовано імітаційну модель, що дозволяє досліджувати вплив гетерогенності ресурсів на продуктивність та ефективність роботи віртуалізованої інфраструктури, отримано кількісні та якісні показники функціонування ГВЦОД у різних сценаріях навантаження, проведено аналіз результатів моделювання та сформульовано рекомендації щодо підвищення ефективності керування різнорідними ресурсами. Подальші дослідження буде спрямовано на розширення імітаційної моделі з урахуванням енергоспоживання та енергоефективності гетерогенних ресурсів.

Ключові слова: центр обробки даних, гетерогенність, віртуалізація, багатокомпонентність, імітаційна модель.

Вступ

Стрімкий розвиток інформаційних технологій, хмарних обчислень та сервіс-орієнтованих архітектур зумовлює зростання вимог до продуктивності, масштабованості та ефективності сучасних центрів обробки даних. У реальних умовах експлуатації центри обробки даних формуються на основі різнорідних апаратних платформ, мережових рішень та програмних середовищ, що призводить до появи гетерогенних обчислювальних інфраструктур [1]. Така гетерогенність ускладнює процеси керування ресурсами, балансування навантаження та забезпечення заданого рівня якості обслуговування.

Використання технологій віртуалізації є ключовим підходом до об'єднання різнорідних ресурсів у єдине логічне середовище, проте в умовах гетерогенності зростає складність аналізу поведінки системи, прогнозування її характеристик та оцінювання ефективності прийнятих рішень [2]. Проведення експериментів безпосередньо на реальному гетерогенному віртуалізованому центрі обробки даних є економічно витратним, технічно складним та часто неможливим.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває застосування імітаційного моделювання як інструменту дослідження процесів функціонування гетерогенних віртуалізованих центрів обробки даних [3]. Імітаційні моделі дозволяють враховувати різнорідність ресурсів, динамічний характер навантажень, механізми віртуалізації та взаємодію компонентів системи, забезпечуючи отримання достовірних кількісних і якісних характеристик [4, 5].

Таким чином, проектування структури імітаційної моделі гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних є актуальним науково-практичним завданням, вирішення якого сприяє підвищенню ефективності керування ресурсами, оптимізації функціонування обчислювальних інфраструктур та обґрунтованому прийняттю проектних рішень [6].

Об'єктом дослідження є процес обробки даних у гетерогенній віртуалізованій центрі обробки даних як складна багатокомпонентна обчислювальна система, що об'єднує різнорідні апаратні, програмні та мережові ресурси у єдину інфраструктуру.

Предметом дослідження є методи та засоби імітаційного моделювання процесів функціонування гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних, зокрема моделі взаємодії різнорідних ресурсів, механізми їх віртуалізації та алгоритми розподілу навантаження.

Метою дослідження є проектування та дослідження структури імітаційної моделі гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних, що дозволяє аналізувати вплив різнорідності обчислювальних, мережових і програмних ресурсів на ефективність функціонування системи, а також оцінювати характеристики продуктивності, масштабованості та керування ресурсами в умовах віртуалізації.

1. Обґрунтування вибору середовища імітаційного моделювання

У даній роботі розглянуто завдання синтезу складної системи використовуючи засоби комп'ютерного моделювання. З усіх доступних методів найкращим вибором є застосування інструментів

імітаційного моделювання (ІМ), оскільки це найпоширеніший підхід вирішення таких завдань [7].

Головна ціль моделювання полягає у отриманні як кількісних, і якісних результатів з урахуванням імітаційної моделі [8]. Під якісними характеристиками маються на увазі виявлені властивості моделюється системи, а під кількісними - значення змінних та їх характеристики. Створення комп'ютерної моделі є складне завдання, оскільки необхідно враховувати всі

внутрішні зв'язки об'єкта моделювання, і модель повинна точно відображати всі його фактори. Тому потрібно проаналізувати існуючі інструменти імітаційного моделювання на ринку, здатні вирішити поставлені дослідницькі завдання. В даний час на ринку програмного забезпечення для імітаційного моделювання представлено безліч різних продуктів, розробники яких пропонують широкий спектр систем різних методів імітаційного моделювання. (табл. 1) [9].

Таблиця 1 – Програмне забезпечення для імітаційного моделювання

Методи ІМ	Програмні інструменти імітаційного моделювання
Дискретно-подійне	GPSS, AnyLogic, Arena, Extend, PowerSim Studio, ProModel, Pilgrim, SimScript, FlexSim та ін.
Системна динаміка	AnyLogic, SimBioSys, eMPlant, Plant Simulation, SimuLab, VenSim, Pilgrim, Stella та ін.
Агентне моделювання	AnyLogic, SimAgent, SimBioSys, AgentSpeak, TeleScript, RePast, NetLogo, Mason та ін.

Так як структурою архітектури програмного комплексу підтримки процесу перерозміщення ВМ обрано парадигму «менеджер-агент», то вибір середовища моделювання був зроблений на користь програмного продукту FlexSim. Це середовище імітаційного моделювання має низку переваг: необхідні для вирішення дослідницьких завдань вбудовані бібліотеки, можливість програмування на Java для створення нестандартних властивостей об'єктів та класів, зручний та інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс, безліч прикладів моделей та вичерпна документація [10, 11]. Платформа також пропонує гнучкість та потужні аналітичні інструменти.

2. Формування структури імітаційної моделі гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних

Структура імітаційної моделі гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних (ГВЦОД) представлена такими модулями (генераторами структурних елементів):

- 1) модуль генерації параметрів ЦОД;
- 2) модуль створення параметрів кластера;
- 3) модуль створення параметрів ВМ;
- 4) модуль генерації параметрів ЖМ.

У модулі генерації «Параметри ЦОД» генерується кількість кластерів ФМ, представлених як кластери серверів, оскільки ЖМ ВМ здійснюється в межах одного кластера.

У модулі генерації «Параметри кластера» ФМ визначається кількість серверів (ФМ) і пропускна здатність кластера, при цьому в кожному сервері генеруються ресурси: С (CPU), М (RAM).

Тип ГВ (g_1, g_2) представлений типом алгоритму ЖМ: g_1 – це Pre-cory; g_2 – це Post-cory.

У модулі генерації «Параметри ВМ» визначається кількість ВМ із запитуваними/споживаними ресурсами: С (CPU), М (RAM). Для кожної ВМ генеруються різні за обсягом ресурси. У модулі генерації «Параметри ЖМ» реалізовано два алгоритми ЖМ ВМ Pre-cory та Post-cory:

1) з урахуванням методу XEN SandPiper – XEN SandPiper;

2) з урахуванням методу обчислення навантаження віртуалізованого сервера – МНВС;

3) розроблений алгоритм перерозміщення ГВЦОД на основі метаевристики

Вигляд інтерфейсу налаштування структури ГВЦОД розробленої імітаційної моделі представлений на рис. 1.

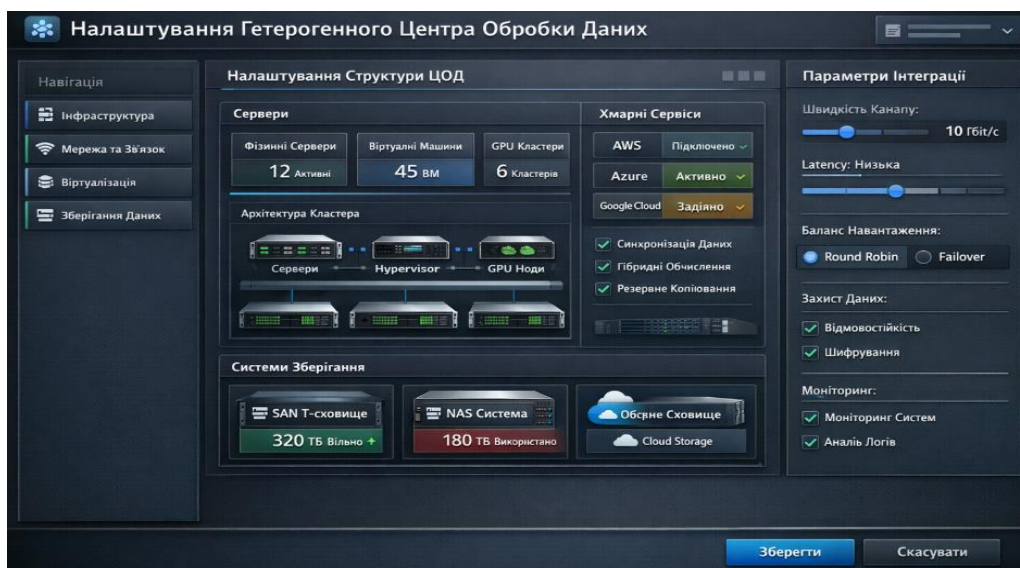


Рис. 1. Інтерфейс налаштування структури гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних

3. Експериментальна оцінка збіжності та обчислювальної складності алгоритму перерозміщення віртуальних машин віртуалізованого центру обробки даних

Для оцінювання ступеня досягнення мети дослідження було ухвалено рішення щодо проведення імітаційного експерименту на розробленому симуляторі ГВЦОД. Для перевірки розробленого алгоритму перерозміщення ВМ на властивість збіжності необхідно запустити алгоритм на розробленій імітаційній моделі ГВЦОД і перевірити, чи він зупиниться після виконання кінцевого числа кроків з виведенням результату. Конфігурація використовуваного в експерименті комп'ютера включає:

- процесор Intel Core i7-2500 CPU;
- ОЗУ – 16 Гб;
- відеоадаптер Intel HD Graphics;
- операційна система MS Windows 11 PRO.

У ході проведення експерименту результати порівняльного аналізу часу роботи алгоритму були зведені до табл. 2 та представлені на графіку рис. 2.

Таблиця 2 – Оцінка тимчасової складності алгоритму перерозміщення віртуальних машин

№ прогону	Розмір вхідних даних, ФМ	Час роботи алгоритму t , с
1	10	0,55
2	20	2,56
3	30	5,55
4	40	9,51
5	50	13,8
6	60	17,7
7	70	21,02
8	80	24,59
9	90	27,63
10	100	31,08

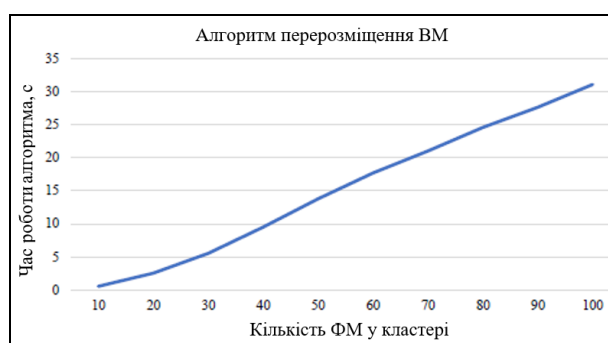


Рис. 2. Залежність тривалості роботи алгоритму перерозміщення ВМ від збільшення обсягу кластера ФМ

Результати експерименту дозволяють дійти висновку, що час роботи алгоритму перерозміщення ВМ збільшується лінійно зі збільшенням розміру кластера. Для кластера розміром 100 ФМ час прийняття рішення становить близько 31,08 секунд, що є цілком прийнятним часом виконання для автономного алгоритму.

Таким чином можна дійти невтішного висновку, що запропонований алгоритм перерозміщення ВМ є швидким і здійснюється методом у тих великомасштабних ЦОД.

Висновки

У статті розглянуто проектування структури імітаційної моделі гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних (ГВЦОД), функціонування якого базується на використанні різнорідних обчислювальних, мережевих та програмних ресурсів. Основну увагу приділено обґрунтуванню вибору середовища імітаційного моделювання як ефективного інструменту дослідження складних гетерогенних систем. Показано, що імітаційне моделювання дозволяє адекватно враховувати неоднорідність апаратних платформ, відмінності у продуктивності ресурсів, особливості віртуалізації та їх вплив на загальну поведінку ГВЦОД. Отримані результати формують основу для подальшої побудови імітаційної моделі ГВЦОД та дослідження ефективності керування різнорідними ресурсами в різних режимах роботи.

Гетерогенність обчислювальних ресурсів, що проявляється у різній архітектурі, продуктивності та функціональному призначенні апаратних і програмних компонентів, суттєво ускладнює процес аналізу та проектування сучасних центрів обробки даних.

Імітаційне моделювання є найбільш доцільним підходом для дослідження гетерогенних віртуалізованих систем, оскільки дозволяє враховувати різнорідність ресурсів, механізми їх об'єднання у віртуальне середовище та динамічний характер розподілу навантаження. Використання імітаційних моделей забезпечує можливість отримання кількісних показників ефективності роботи ГВЦОД, а також якісних характеристик, що відображають вплив гетерогенності на стабільність і масштабованість системи. Проведений аналіз середовищ імітаційного моделювання показав, що правильний вибір інструментів дозволяє ефективно досліджувати сценарії функціонування гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних.

Подальші дослідження буде спрямовано на розширення імітаційної моделі з урахуванням енергоспоживання та енергоефективності гетерогенних ресурсів, дослідження адаптивних і інтелектуальних алгоритмів керування ресурсами в гетерогенних віртуалізованих центрах обробки даних, інтеграцію моделей відмовостійкості та надійності для аналізу поведінки ГВЦОД в умовах збоїв і деградації ресурсів, моделювання сценаріїв масштабування та міграції віртуальних машин у гетерогенному середовищі, оптимізацію розподілу навантаження та прогнозування станів гетерогенного віртуалізованого центру обробки даних.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

REFERENCES

1. Pyrozhenko S., and Radchenko V. (2025), "Methods and algorithms for virtual machine migration", *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава : Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2025. вип. 3(81), С. 167–171, doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.3.167>
2. Silva, D., Rafael, J. & Fonte, A., 2023. Virtualization Maturity in Creating System VM: An Updated Performance Evaluation. *Int. Journal of Electrical and Computer Engineering Research*, 3(2), pp. 7–17. <https://doi.org/10.53375/ijecer.2023.341>
3. 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>
4. 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>
5. 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>.
6. 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>.
7. 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>.
8. 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>.
9. 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>.
10. Nechausov, A., Mamusuč, 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. 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) 16.10.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 14.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

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; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0006-4209-2144>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59675302400&origin=resultlist>.

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

Artem Guk – senior lecturer of Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Viacheslav.Radchenko@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0004-2011-1901>.

Методи та алгоритми міграції віртуальних машин

Serhii Pyrozhenko, Artem Guk

Abstract. Relevance of the study. In real operating conditions, data centers are formed on the basis of heterogeneous hardware platforms, networking solutions, and software environments, which leads to the emergence of heterogeneous computing infrastructures. Such heterogeneity complicates resource management processes, load balancing, and the provision of a specified level of service quality. **The object of the study** is the data processing process in a heterogeneous virtualized data center as a complex multi-component computing system that integrates diverse hardware, software, and network resources into a unified infrastructure. **The subject of the study** comprises methods and tools for simulation modeling of the functioning processes of a heterogeneous virtualized data center, in particular models of interaction among heterogeneous resources, mechanisms of their virtualization, and load distribution algorithms. **The purpose of the study** is to design and investigate the structure of a simulation model of a heterogeneous virtualized data center that makes it possible to analyze the impact of heterogeneity of computing, network, and software resources on system performance, as well as to evaluate performance, scalability, and resource management characteristics under virtualization conditions. **Research results.** In the course of the work, the structure of a simulation model of a heterogeneous virtualized data center was developed, taking into account the heterogeneity of hardware and software resources; the choice of a simulation environment for studying the functioning processes of the heterogeneous virtualized data center was substantiated; a simulation model was implemented that allows investigation of the impact of resource heterogeneity on the performance and efficiency of the virtualized infrastructure; quantitative and qualitative indicators of the functioning of the heterogeneous virtualized data center under various load scenarios were obtained; the modeling results were analyzed and recommendations were formulated to improve the efficiency of managing heterogeneous resources. **Further research** will be aimed at extending the simulation model to account for energy consumption and energy efficiency of heterogeneous resources.

Keywords: data center, heterogeneity, virtualization, multi-component system, simulation model.

О. А. Поворознюк, А. І. Поворознюк

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЙНО-ПОШУКОВА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОННОЇ КОМЕРЦІЇ З ОЦІНКОЮ РЕЛЕВАНТНОСТІ ПОШУКУ

Анотація. **Актуальність.** В роботі розглянуто процес розробки інформаційно-пошукової системи для сучасних систем електронної комерції з оцінкою релевантності результатів пошуку. Класичні пошукові механізми, що ґрунтуються лише на збігу ключових слів, часто не враховують контекст та морфологію запитів, синоніми та вагомість окремих слів, ступінь відповідності знайдених результатів очікуванням користувача. Тому актуальним є створення інтелектуальних пошукових систем з оцінкою релевантності результатів пошуку, які здатні враховувати наміри користувача та адаптуватися до його індивідуальних потреб. **Предметом дослідження є методи підвищення релевантності результатів пошуку на основі аналізу запитів користувачів та ранжування характеристик товарів. Мета роботи полягає** в підвищенні ефективності пошуку у інформаційно-пошукових системах електронної комерції шляхом впровадження модифікованого методу оцінки релевантності. **Були отримані наступні результати.** Розглянуто особливості формування пошукових потреб користувачів, проведено аналіз моделей оцінки релевантності, розроблено та протестовано систему електронної комерції з оцінкою релевантності, яка засвідчила покращення показників ефективності пошуку. **Висновки.** Використання методів оцінки релевантності для побудови пошукових систем у сфері електронної комерції є ефективним напрямом підвищення якості інформаційно-пошукових сервісів. Отримані результати свідчать про перспективність подальших досліджень у напрямі адаптації моделей інформаційного пошуку до специфіки онлайн-торгівлі, удосконалення алгоритмів ранжування та інтеграції методів машинного навчання для персоналізації видачі результатів.

Ключові слова: електронна комерція, пошукова система, комп'ютерна система, базова модель, релевантність, ранжування, ефективність пошуку, модель оцінки релевантності.

Вступ

Постановка проблеми. У сучасних умовах стрімкого розвитку електронної комерції, ефективність функціонування інтернет-магазину значною мірою визначається якістю та зручністю пошуку товарів. Користувачі очікують отримати релевантні результати запиту за лічені секунди, а будь-яка затримка або неточність у видачі може призвести до втрати потенційного покупця. Проблема точності пошуку особливо актуальна для великих інтернет-магазинів із широким асортиментом, де класичні методи пошуку часто не враховують контекст, морфологію запитів, синонімію та вагомість окремих слів.

В умовах високої конкуренції якість пошукової системи стає одним із ключових факторів, що впливає на рівень конверсії, задоволеність клієнтів та фінансові показники бізнесу. Відсутність системи оцінки релевантності пошукових результатів призводить до того, що користувачі не знаходять потрібні товари або отримують невідповідні результати, що знижує ефективність платформи загалом. Саме тому створення інтелектуальної пошукової системи з механізмом оцінки релевантності є актуальним завданням для сучасних систем електронної комерції.

Аналіз літератури. Інформаційно-пошукова система (ІПС) є складним комплексом програмних і апаратних засобів, що забезпечують процеси збирання, зберігання, оброблення та видачі інформації відповідно до інформаційних потреб користувачів [1]. ІПС виконують наступні операції:

- пошук документів;
- аналіз вмісту документів;
- побудова пошукових образів документів (вигляд з документів інформації, що використовується системою як знання про документ);

- зберігання пошукових образів документів (відомостей про документи);

- аналіз запитів користувачів (споживачів інформації);

- пошук релевантних (відповідних) запитів документів;

- видача посилань на документи споживачам.

Ефективність інформаційного пошуку визначають показники, що характеризують знаходження релевантних документів. Вони поділяються на семантичні (точність і повнота пошуку, коефіцієнт інформаційного шуму та коефіцієнт втрат) та техніко-економічні (оперативність пошуку, вартість та трудомісткість пошуку) [2].

У сучасному інформаційному суспільстві, де обсяги даних зростають у геометричній прогресії, пошук релевантної інформації стає ключовим завданням. Саме тому розробка ефективних пошукових систем є одним із найважливіших напрямів у сфері інформаційних технологій [3].

Релевантність у цьому контексті визначається як ступінь відповідності документа інформаційному запиту користувача. Вона може мати як об'єктивний, так і суб'єктивний характер: з одного боку, існують формальні критерії відповідності, з іншого – індивідуальні очікування користувача, які не завжди можна точно описати математично. Тому сучасні пошукові системи прагнуть поєднувати формальні алгоритми з елементами адаптації до поведінки користувача [4].

Класифікація пошукових систем може здійснюватися за різними критеріями. Найчастіше виділяють системи, орієнтовані на текстові дані, мультимедійні ресурси або структуровані бази даних. За принципом пошуку розрізняють повнотекстові системи, що аналізують увесь вміст документа, систе-

ми, які працюють лише з метаданими, та гібридні рішення. Нарешті, за сферою застосування пошукової системи поділяють на універсальні, спеціалізовані та корпоративні.

Інтернет-магазини призначені для пошуку та продажу конкретних товарів та послуг. Вони можуть розглядатися як спеціалізовані ІПС, орієнтовані на пошук в обмеженій базі даних товарів, а не в масиві документів, як у пошукових системах типу Google.

Незважаючи на вказані обмеження, слід зрозуміти, що навіть у межах електронної комерції можуть існувати різні підходи до організації пошуку: від простого пошуку за назвою товару до складних систем, що враховують семантику запиту та індивідуальні вподобання клієнта [5].

Додатково варто зазначити, що розвиток пошукових систем тісно пов'язаний із еволюцією методів обробки природної мови. Якщо на початкових етапах пошук зводився до простого співставлення ключових слів, то сьогодні все більшого значення набуває семантичний аналіз, який дозволяє враховувати контекст запиту. Це означає, що система здатна розпізнавати не лише буквальний збіг слів, а й смислові зв'язки між ними. Такий підхід особливо важливий у сфері електронної комерції, де користувач може формулювати запит у довільній формі, наприклад: «зручні кросівки для бігу» або «ноутбук для роботи з графікою».

Ще однією тенденцією є інтеграція пошукових систем із механізмами рекомендацій. Сучасні інтернет-магазини не лише надають користувачеві список товарів, що відповідають його запиту, а й пропонують додаткові варіанти, які можуть його зацікавити. Це досягається завдяки аналізу поведінкових факторів: історії переглядів, попередніх покупок, часу перебування на сторінках. Таким чином, пошукова система перетворюється на інструмент персоналізації, що підвищує ймовірність здійснення покупки.

Важливим аспектом є й оцінка ефективності пошукових систем [6]. Традиційно для цього використовують такі показники, як повнота (частка релевантних документів, які система змогла знайти) та точність (частка знайдених документів, що дійсно є релевантними). У практиці електронної комерції ці критерії набувають прикладного значення: якщо пошук видає занадто багато нерелевантних результатів, користувач може залишити сайт; якщо ж система не знаходить потрібний товар, магазин втрачає потенційного клієнта. Тому завданням розробників є досягнення оптимального балансу між повнотою та точністю пошуку.

У підсумку можна сказати, що інформаційно-пошукові системи є не лише технічним інструментом, а й важливим елементом взаємодії користувача з інформаційним середовищем [7]. Їхня класифікація та розвиток відображають загальні тенденції в інформаційних технологіях: від простого пошуку за ключовими словами до інтелектуальних систем, здатних розуміти наміри користувача та адаптуватися до його індивідуальних потреб.

Метою дослідження є розробка та впровадження інформаційно-пошукової системи з оцінкою релевантності результатів пошуку для інтернет-магазину на базі платформи WordPress з використанням плагіна WooCommerce. Основна задача полягає у створенні адаптивного пошукового механізму, здатного підвищити точність і швидкість видачі результатів завдяки використанню алгоритмів оцінки релевантності.

1. Особливості формування пошукових потреб користувачів в інтернет-магазинах

Пошук товарів в інтернет-магазині здійснюється користувачами в межах певних інформаційних потреб, які формуються залежно від намірів та рівня володіння інформацією щодо об'єкта пошуку [8]. Потреба у пошуку виникає внаслідок необхідності отримання доступу до даних про товар, що включають його найменування, функціональні властивості, технічні параметри, виробника, вартість та інші споживчі характеристики. Користувачі застосовують пошукову систему з метою оптимізації процесу орієнтації у товарному асортименті, скорочення часу на пошук необхідної інформації та зменшення кількості посередніх операцій під час навігації вебресурсом.

Особливості поведінки користувачів при пошуку товарів визначають специфіку вимог до пошукової системи інтернет-магазину. Для більшості користувачів характерним є формування пошукового запиту на основі власного уявлення про товар, яке не завжди відповідає термінології, що використовується у каталозі товарів.

Це ускладнює процес оброблення запиту та може призводити до отримання нерелевантних результатів.

Важливою властивістю поведінкових характеристик користувачів є очікування отримання релевантної інформації у найкоротший строк, що обумовлює потребу у функціонуванні пошукової системи з мінімальною затримкою відгуку, високою точністю формування результатів і здатністю до оброблення пошукових запитів різного ступеня деталізації.

У процесі взаємодії користувача із пошуковою системою інтернет-магазину спостерігається тенденція до зниження толерантності до помилок пошуку. У разі отримання нерелевантних або неповних результатів користувачі рідко здійснюють повторне формулювання запиту, натомість припиняють взаємодію із вебресурсом, що в підсумку формує втрату потенційного покупця. Це свідчить про необхідність забезпечення коректної обробки варіативних форм пошукових запитів, а також адекватного врахування лексичних, лінгвістичних та контекстуальних особливостей формулювання користувачьких запитів.

Таким чином, ефективність процесу пошуку товарів в інтернет-магазині визначається здатністю пошукової системи забезпечити точність, повноту та логічність формування результатів запиту, а також відповідністю його фактичним очікуванням користувача.

2. Принципи роботи інформаційно-пошукової системи

Будь-яка пошукова система функціонує на основі кількох ключових компонентів. Центральним елементом є модуль індексування, який виконує попередню обробку даних. Під час індексації текст розбивається на окремі одиниці - токени, що потім нормалізуються шляхом лематизації. Важливим етапом є видалення так званих стоп-слів, які не несуть смислового навантаження. Результатом цього процесу стає інвертований індекс – структура даних, що дозволяє швидко знаходити документи, у яких зустрічається певний термін. Його можна представити у вигляді формули:

$$I(t) = \{d_1, d_2, \dots, d_1\}, \quad (1)$$

де $I(t)$ – множина документів, у яких зустрічається термін t ; t – термін (слово або лексема), що індексується; $\{d_1, d_2, \dots, d_1\}$ – документи, які містять термін t .

Окрім індексування, важливу роль відіграє модуль оброблення запитів. Він аналізує введений користувачем текст, трансформує його у внутрішнє подання та порівнює з індексом. Завершальним елементом є інтерфейс користувача, який забезпечує зручність взаємодії з системою (рис. 1).

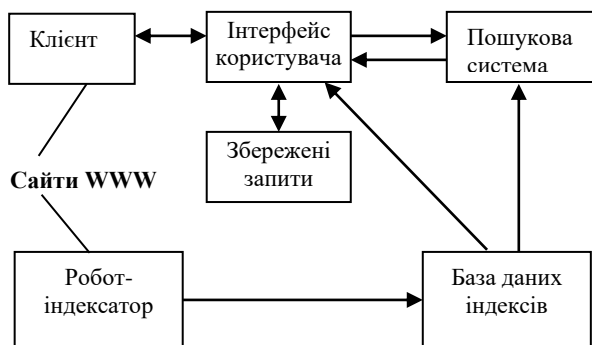


Рис. 1. Загальна архітектура пошукової системи

3. Аналіз моделей оцінювання релевантності

Оцінювання релевантності є центральним завданням будь-якої пошукової системи. Існує кілька моделей, які визначають спосіб обчислення схожості між запитом і документом [9].

Інформаційний пошук (ІП) – це процес пошуку релевантних даних або документів у відповідь на запит користувача.

На теперішній час розроблено кілька моделей ІП, в результаті якого пошукові системи витягують та ранжують інформацію. Ці моделі поділяються на три основні типи:

- традиційні моделі,
- моделі, орієнтовані на користувача,
- когнітивні моделі.

Вони, як правило, характеризуються відповідними алгоритмами та ефективністю роботи. Нижче наводиться докладний огляд кожної з них:

1. *Традиційні моделі.* Ці моделі фокусуються на структурних та обчислювальних аспектах пошуку

інформації, оптимізуючи індексацію, вилучення та ранжування документів на основі запитів.

А) Бульова модель. Це одна з найраніших моделей, що використовує булеву логіку (І, АБО, НЕ) для обробки запитів та зіставлення їх із документами. Документ може бути релевантним або нерелевантним залежно від того, чи він задовольняє умовам запиту. Основні характеристики: витягує документи на основі точного збігу з термінами запиту; результат є бінарним: релевантним чи ні; не допускає часткових збігів або ранжирування документів щодо релевантності.

Б) Модель векторного простору (VSM). Документи та запити представлені у вигляді векторів у багатовимірному просторі, де кожен вимір відповідає терміну [10]. Релевантність у цьому випадку визначається за косинусною мірою подібності (2):

$$S_{im}(d, q) = \sum_i (w_{i,d} \cdot w_{i,q}) / \left(\sqrt{\sum_i w_{i,d}^2} \cdot \sqrt{\sum_i w_{i,q}^2} \right), \quad (2)$$

де $w_{i,d}$ – вага терміна у документі; $w_{i,q}$ – вага терміна у запиті.

Одним із найпоширеніших способів визначення ваг є метод TF-IDF (term frequency – inverse document frequency), який враховує як частоту терміна в документі, так і його рідкість у колекції (3):

$$w_{i,d} = tf_{i,d} \cdot \log \left(\frac{N}{df_i} \right) \quad (3)$$

де $w_{i,d}$ – вага терміна i у документі d ; $tf_{i,d}$ – частота терміна i у документі d (кількість його появ); N – загальна кількість документів у колекції; df_i – кількість документів, у яких зустрічається термін i ; $\log \left(\frac{N}{df_i} \right)$ – обернена частота документа, яка зменшує вагу термінів, які часто зустрічаються.

Модель допускає часткові збіги та ранжує документи з релевантності.

В) Ймовірнісна модель. Ця модель ґрунтується на ідеї оцінки ймовірності того, що документ є релевантним запиту. Вона використовує статистичні методи для ранжування документів за ймовірністю їхньої релевантності та забезпечують більш точне ранжування результатів (рис. 2) [10].

Term	DF	IDF	TF			TF-IDF		
			d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3
car	18,16	1,6	27	4	24	44,5	6,6	39,6
autol	6,72	2,0	3	33	0	6,2	68,6	0
insur.	19,24	1,6	0	33	29	0	53,4	46,9
best	25,23	1,5	14	0	17	21		25,5

Рис. 2. Приклад таблиці з розрахунком TF-IDF для невеликої колекції товарів

Основні характеристики: документам надають ймовірності релевантності; розповсюджена реалізація: BM25, яка уточнює частоту термінів за допомогою нормалізації довжини документа.

Г) Модель кластеризації. Ця модель групує схожі документи на основі загальних ознак, викори-

стовуючи методи неконтрольованого навчання, такі як K -середня або ієрархічна кластеризація.

Основні характеристики: групує документи у значні кластери; підвищує ефективність за допомогою звуження релевантних наборів; Допомагає керувати великими наборами даних.

Д) Модель найкращої відповідності. Ця модель ранжує документи за їх релевантністю заданому запиту, часто використовується в пошукових системах для повернення в першу чергу найбільш релевантних документів. Основні характеристики: використовує подібні засоби (наприклад, косинусну подібність або BM25); орієнтована на зіставлення термінів запиту з вмістом документа.

2. Моделі, орієнтовані на користувача. Ці моделі фокусуються на потребах, уподобаннях користувача та контексті, в якому виконується запит. Вони спрямовані на підвищення ефективності систем пошуку, враховуючи взаємодію користувача, його наміри та задоволеність.

А) Модель розширення запиту. Ця модель розширює запит, додаючи пов'язані терміни, синоніми або концепції, отримані з попередніх пошуків користувача або зовнішніх джерел. Основні характеристики: відповідає на невизначені та двозначні запити; включає такі методи, як автоматична генерація тезаурусу або семантичний аналіз; допомагає знаходити більше релевантних документів за рахунок розширення пошукових запитів.

Б) Модель зворотного зв'язку з релевантності. Ця модель уточнює результати пошуку на основі відгуків користувачів, які вказують релевантність документів, що відображаються, а система відповідним чином коригує свій пошук. Основні характеристики: уточнює пошук, враховуючи відгуки користувачів; зворотний зв'язок може бути явним (явна позначка документів як релевантних чи ні) або прихованим (аналіз поведінки користувача, наприклад, кількість кліків або часу, витраченого на документи); часто інтегрується з іншими моделями, такими як VSM.

В) Модель персоналізованого пошуку інформації. Ця модель адаптує результати пошуку на основі даних, специфічних для користувача, таких як історична поведінка, уподобання, розташування або демографічна інформація. Основні характеристики: налаштовує результати пошуку для кожного окремого користувача; використовує такі методи, як профілювання користувачів та спільна фільтрація; підвищує задоволеність, надаючи більш релевантні, персоналізовані результати.

3. Когнітивні моделі. Когнітивні моделі вивчають, яким чином людське пізнання та розумові процеси впливають на пошук інформації. Вони спрямовані на розробку систем, що узгоджуються з людським мисленням, сприйняттям та пам'яттю.

А) Модель когнітивного навантаження. Ця модель спрямована на мінімізацію розумових зусиль, необхідних для обробки інформації. Вона спрямована на зниження когнітивного навантаження під час виконання завдань пошуку та вилучення інформації.

Основні характеристики: знижує когнітивну напругу за рахунок чіткого подання інформації; може мати на увазі спрощення інтерфейсів та алгоритмів пошуку; підвищує зручність використання з допомогою скорочення розумових ресурсів, необхідних для виконання таких завдань, як пошук і читання.

Б) Когнітивна модель, орієнтована користувача (підхід ментальної моделі). Ця модель передбачає, що користувачі повинні сформувати ментальне уявлення про систему та її функціональність. Розуміння цих ментальних моделей може допомогти у проектуванні систем, які краще відповідають очікуванням користувачів.

Основні характеристики: основна увага приділяється узгодженню поведінки системи з ментальними моделями користувачів; допомагає передбачити, чого користувачі очікують від системи; враховує то, як користувачі з часом удосконалюють своє розуміння системи.

В) Модель збору інформації. Ця модель, передбачає, що користувачі шукають інформацію подібно до того, як тварини шукають їжу. Користувачі адаптують свої пошукові стратегії для максимального отримання інформації.

Основні характеристики: користувачі коригують свої стратегії пошуку, щоб знайти найбільш релевантну інформацію; підкреслює баланс між дослідженням (пошуком нової інформації) та використанням відомої, релевантної інформації; спрямовані на те, можуть бути розроблені, щоб допомогти користувачам більш ефективно знаходити інформацію, надаючи її в доступному форматі.

4. Алгоритми ранжування результатів пошуку

Сучасні пошукові системи використовують комбінацію методів: від класичних статистичних підходів до алгоритмів машинного навчання. Одним із найефективніших є алгоритм BM25, що ґрунтується на ймовірнісній інтерпретації релевантності:

$$Sr(d, q) = \sum_i F(q_i) \frac{tf_i(k+1)}{tf_i + k(1-b + b(|d|/dl))}, \quad (4)$$

де $Sr(d, q)$ – оцінка релевантності документа d щодо запиту q ; $F(q_i)$ – обернена частота документа для терміна q_i ; tf_i – частота терміна i у документі; k – параметр, що контролює насичення частоти терміна (зазвичай $k \in [1, 2, 2, 0]$); b – параметр нормалізації довжини документа (зазвичай $b \in [0, 75, 1, 0]$); $|d|$ – довжина документа d (кількість термінів); dl – середня довжина документа в колекції.

Ця модель враховує як частоту терміна, так і довжину документа, що дозволяє уникнути переоцінки великих текстів.

У поєднанні з методами семантичного аналізу та машинного навчання BM25 забезпечує високу точність пошуку навіть у великих колекціях даних (рис. 3) [11].

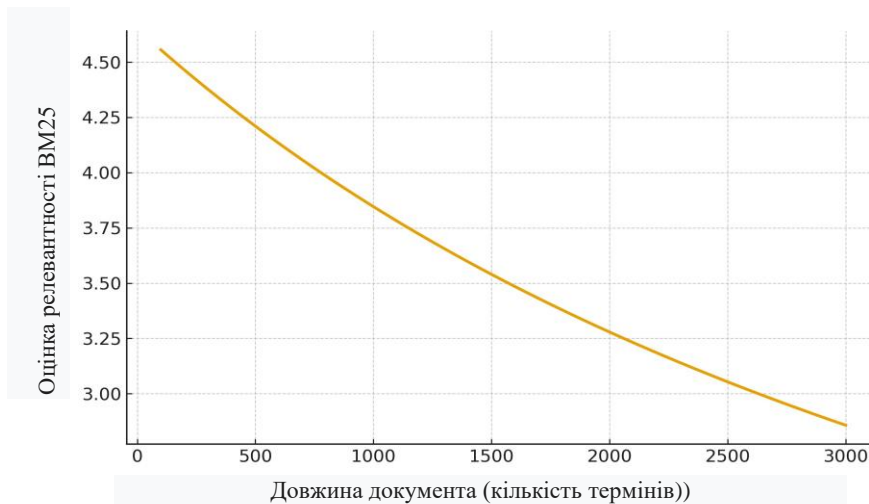


Рис. 3. Залежність оцінки релевантності BM25 від довжини документа

Важливим інструментом підвищення точності є використання словників синонімів та тематичних онтологій. Завдяки цьому пошукова система здатна враховувати не лише буквальне співпадіння термінів, а й їхні семантичні зв'язки. Наприклад, у сфері електронної комерції користувач може шукати «смартфон», тоді як у базі даних товар може бути позначений як «мобільний телефон». Якщо система враховує ці синонімічні відношення, вона здатна видати релевантний результат навіть за відсутності точного співпадіння.

Ще одним напрямом є розширення запитів, коли до початкового пошукового виразу додаються додаткові терміни, що уточнюють або розширюють його зміст. Це може здійснюватися як автоматично, так і за участю користувача. У сучасних системах усе більшого значення набуває персоналізація по-

шуку, яка враховує історію попередніх дій користувача, його інтереси та поведінкові характеристики. Такий підхід дозволяє формувати результати, максимально наближені до індивідуальних потреб конкретної людини [12].

Для кількісного аналізу якості пошуку застосовуються метрики точності (Precision) та повноти (Recall). Перша показує, яка частка знайдених документів є релевантною, тоді як друга відображає, яку частку від усіх релевантних документів система змогла знайти. Для комплексної оцінки часто використовується F-міра, яка поєднує обидва показники в єдину метрику. У науковій літературі також зустрічаються інші показники, такі як середня точність (Mean Average Precision) чи NDCG (Normalized Discounted Cumulative Gain), які дозволяють більш детально оцінювати якість ранжування результатів (рис. 4) [13].

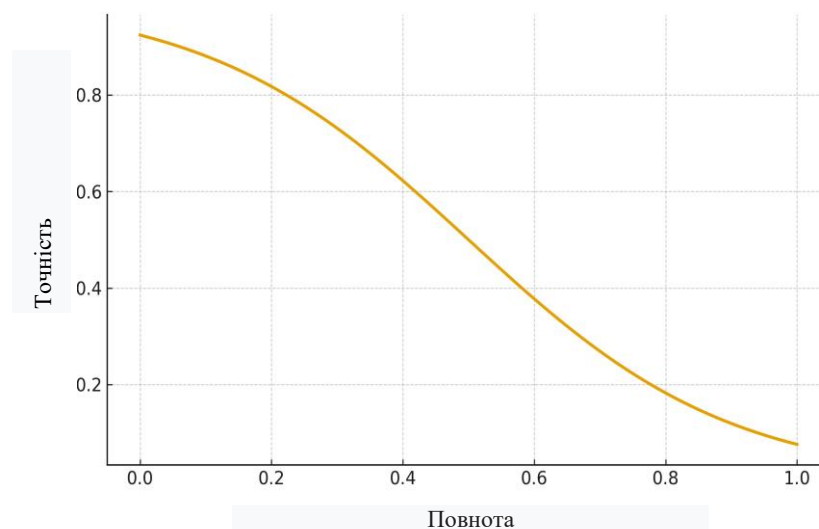


Рис. 4. Залежність між точністю (Precision) та повнотою (Recall) для пошукової системи

5. Сучасні тенденції розвитку пошукових систем

Розвиток пошукових систем тісно пов'язаний із загальними тенденціями в галузі інформаційних технологій. Якщо раніше основна увага приділялася

швидкості пошуку та оптимізації індексів, то сьогодні на перший план виходить семантичний аналіз і використання методів штучного інтелекту. Сучасні системи прагнуть не лише знаходити документи, що містять потрібні слова, а й розуміти зміст запиту, контекст його використання та наміри користувача.

Одним із ключових напрямів є інтеграція методів обробки природної мови (NLP). Завдяки цьому пошукові системи здатні враховувати граматичні конструкції, синонімію, багатозначність слів і навіть емоційне забарвлення тексту. У сфері електронної комерції це дозволяє формувати більш точні рекомендації для користувачів, які шукають товари, використовуючи різні формулювання.

Важливим трендом є застосування методів машинного навчання та глибоких нейронних мереж. Вони дозволяють автоматично виявляти приховані закономірності у великих масивах даних і будувати моделі, що прогнозують релевантність результатів. Наприклад, сучасні алгоритми здатні враховувати не лише текстові характеристики документа, а й поведінкові фактори: частоту кліків, час перебування на сторінці, історію покупок. Це робить пошук більш адаптивним і персоналізованим [14]. Ще однією тенденцією є поєднання пошукових систем із рекомендаційними механізмами. У результаті користувач отримує не лише список документів, що відповідають його запиту, а й додаткові пропозиції, які можуть його зацікавити. Такий підхід особливо актуальний для інтернет-магазинів, де пошук і рекомендації стають взаємодоповнюючими елементами [15].

6. Розробка пошукової системи з оцінкою релевантності

На підставі проведеного аналізу було розроблено пошукову систему інтернет-магазину з оцінкою релевантності пошуку. Реалізовано повноцінний інтернет-магазин на базі системи керування контентом WordPress [16] із використанням плагіну WooCommerce [17] та інтеграцією розширеної пошукової системи Advanced Woo Search [18]. В результаті було створено цілісну інформаційно-пошукову систему, яка відповідає сучасним вимогам електронної комерції.

Першим кроком стало встановлення та налаштування локального середовища WampServer. Це рішення забезпечило можливість розгортання сайту у контрольованих умовах, дозволило працювати з базами даних через phpMyAdmin та надало гнучкість у налаштуванні параметрів PHP і MySQL. Вибір саме WampServer був обґрунтованим, адже він поєднує простоту використання з достатнім функціоналом для реалізації проєкту.

Другим етапом було створення сайту на WordPress. Завдяки простоті інсталяції та широким можливостям налаштування WordPress став оптимальною платформою для реалізації інтернет-магазину. Було налаштовано адміністративну панель, створено базові сторінки та обрано тему, яка підтримує WooCommerce. Це забезпечило основу для подальшої інтеграції функціоналу електронної комерції.

Інтеграція WooCommerce перетворила сайт на повноцінний інтернет-магазин. Було налаштовано сторінки каталогу, кошика та оформлення замовлення, додано товари з різними характеристиками, створено категорії та атрибути. Це дозволило сформувати структуру магазину, яка є зрозумілою для користувачів та відповідає стандартам електронної комерції.

Особливу увагу приділено реалізації пошукової системи за допомогою додаткового Advanced Woo Search. Стандартний пошук WordPress виявився недостатнім для роботи з великим каталогом товарів, тому інтеграція додаткового плагіну стала ключовим рішенням. Його перевагою є можливість налаштування індексації полів товару, застосування вагових коефіцієнтів, гнучке ранжування та підтримка асинхронної видачі результатів.

Advanced Woo Search забезпечив пошук за назвою, описом, категоріями та атрибутами, дозволив налаштувати вагу полів для визначення релевантності результатів та підтримує відображення результатів у режимі реального часу. Це дозволяє реалізувати механізм релевантного пошуку без створення власного пошукового ядра, забезпечуючи при цьому високий рівень адаптивності системи, значно підвищило зручність користування сайтом та зробило пошукову систему більш ефективною.

Було проведено комплексне тестування розробленої інформаційно-пошукової системи. Перше завдання тестування полягає у перевірці базового функціоналу інтернет-магазину. Для цього було створено кілька тестових товарів із різними характеристиками: прості товари з фіксованою ціною, змінні товари з варіаціями, а також товари, розподілені за категоріями. Після додавання товарів було перевірено роботу кошика та сторінки оформлення замовлення. Користувач мав можливість додати кілька позицій у кошик, змінити їхню кількість, видалити непотрібні товари та перейти до оформлення замовлення. На сторінці замовлення система коректно відображала підсумкову вартість, враховувала варіації товарів та пропонувала вибір способу оплати. Це підтвердило, що WooCommerce функціонує відповідно до очікувань. Далі було виконано тестування пошукової системи. Було проведено серію запитів, які включали пошук за назвою товару, пошук за категорією та пошук за атрибутами. Наприклад, при введенні ключового слова «Гранулят» система одразу відображала товари з відповідною назвою, а також позиції, у яких це слово зустрічалося у описі чи категорії. При пошуку за атрибутом «Взуття» користувач отримував список товарів, що мають відповідний колір. Це підтвердило коректність індексації та налаштувань релевантності.

Особливу увагу було приділено порівнянню роботи Advanced Woo Search зі стандартним пошуком WordPress. У випадку базового пошуку результати були значно обмежені, адже система враховувала лише заголовки сторінок і записів. Advanced Woo Search, навпаки, забезпечував пошук по назві, опису, категоріях та атрибутах, що робило результати більш точними та релевантними. Це підтверджує доцільність використання додаткового плагіну у розробці.

Ще одним важливим аспектом тестування є оцінка продуктивності системи. Було перевірено швидкість відображення результатів пошуку у режимі реального часу. Навіть при введенні довгих запитів система працювала без затримок, що свідчить про оптимальність налаштувань. Крім того, було протестовано роботу сайту при додаванні ве-

ликої кількості товарів. Навіть при значному навантаженні пошукова система залишалася стабільною, що підтверджує її масштабованість.

Таким чином, тестування підтвердило працездатність усіх компонентів системи.

7. Обговорення результатів

Тестування функціонування пошукової системи було проведено на основі метрик точності (Precision), повноти (Recall) та показників релевантності відображуваних результатів. Тестування підтвердило працездатність усіх компонентів системи. Інтернет-магазин коректно обробляє замовлення, а пошукова система забезпечує релевантні результати та високу швидкість роботи.

Порівняння стандартного пошуку WordPress та Advanced Woo Search показало значну перевагу останнього, що підтверджує доцільність його використання у розробці. У ході експериментів встановлено, що використання вагової моделі та індексації додаткових інформаційних полів дозволяє значно покращити якість видачі, порівняно зі стандартними засобами WordPress та WooCommerce. Покращення проявляється у зменшенні кількості нерелевантних результатів, швидшому знаходженні потрібних товарів та підвищенні логічності ранжування. Покращення відмічених показників ефективності пошуку становить 15–25% залежно від складності запиту.

Таким чином, практична частина дослідження продемонструвала успішну реалізацію інформаційно-пошукової системи для інтернет-магазину. Вона включає створення локального середовища, розгортання сайту на WordPress, інтеграцію WooCommerce та налаштування розширеного пошуку. Отриманий результат відповідає поставленим завданням і може бути використаний як основа для подальшого розвитку та вдосконалення системи.

Висновки

У результаті виконаної роботи було досягнуто поставлену мету та реалізовано комплекс завдань, спрямованих на розробку інформаційно-пошукової системи інтернет-магазину з механізмом оцінювання релевантності результатів пошуку. У межах дослідження були виконані теоретичні, аналітичні та практичні етапи, які дозволили створити ефективний інструмент для підвищення точності та зручності пошуку товарів.

У процесі роботи було проведено детальний аналіз сучасних підходів до організації пошуку в електронній комерції.

Розглянуто принципи роботи інформаційно-пошукових систем, моделі оцінювання релевантності (TF-IDF, BM25, ймовірнісні та векторні моделі), а

також методи підвищення точності пошуку, включаючи нормалізацію текстів, роботу зі синонімами, ваговими коефіцієнтами та персоналізацією результатів.

Було встановлено, що класичні методи WordPress не забезпечують достатньої якості пошуку у великих товарних каталогах, оскільки не враховують вагу атрибутів, морфологію запитів та контекст користувацької поведінки.

На підставі проведеного аналізу обґрунтовано вибір плагіна Advanced Woo Search як оптимального інструменту для реалізації покращеного пошуку в інтернет-магазині на платформі WordPress.

У практичній частині роботи розроблено та налаштовано повноцінний прототип інтернет-магазину з удосконаленою пошуковою підсистемою. Проведено індексацію товарних полів (назва, опис, короткий опис, категорії, теги, атрибути, артикул), налаштовано вагові коефіцієнти для різних елементів, реалізовано механізми ранжування результатів та динамічну видачу під час введення запиту. Система інтегрована з WooCommerce та повністю підтримує обробку запитів різної структури й складності.

Тестування функціонування пошукової системи показало значну перевагу Advanced Woo Search порівняно зі стандартними засобами WordPress та WooCommerce.

У підсумку, виконана робота дозволила створити ефективну інформаційно-пошукову систему, яка забезпечує релевантне ранжування результатів і значно покращує користувацький досвід при взаємодії з інтернет-магазином. Запропоновані рішення можуть бути використані для подальшого розширення функціональності магазину, інтеграції рекомендаційних систем, підключення семантичного аналізу чи моделей машинного навчання. Також сформульовано рекомендації щодо можливих напрямів удосконалення, зокрема впровадження семантичного пошуку, індивідуалізації результатів на основі поведінкових даних та використання зовнішніх модулів NLP для підвищення точності оброблення складних запитів.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стоєва Д. Р. Систематизація інформаційних моделей. *Перспективи науки і освіти*. 2021. No 4. С. 13-18. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2021-1\(1\)-21-30](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2021-1(1)-21-30)
2. Мілованова М.В., Бондарчук А.П. Оцінка ефективності інформаційного пошуку. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2020. No 1 (66) С. 45 -52. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2020.014552>
3. Manning, C. D., Raghavan, P., Schütze, H. *Introduction to Information Retrieval*. Cambridge University Press, 2008. URL: <https://nlp.stanford.edu/IR-book/pdf/irbookonlinereading.pdf>

4. Васютинська С. Ю. Інформаційна асиметрія в освітніх технологіях. *Освітні ресурси і технології*. 2016. № 4 (16). С. 14-20. DOI: <https://yspu.net/sit/index.php/sit/article/view/3073>
5. Краус К.М., Краус Н.М., Манжура О.В. Електронна комерція та Інтернет-торгівля: навчально-методичний посібник. –Київ: Аграр медіа Груп, 2021, 454 с. URL: https://elibrary.kubg.edu.ua/id/eprint/37044/1/Kraus_Elektronna_komertsii_2021.pdf
6. Кряжич О.О. Визначення релевантності інформації, отриманої від пошуково-довідкового сервісу на веб-платформі. *Математичні машини і системи*. 2021. № 1 С 52-63. URL: http://www.immsp.kiev.ua/publications/articles/2021/2021_1/01_21_Kryazhych.pdf
7. P. Vakkari, E. Sormunen. The influence of relevance levels on the effectiveness of interactive information retrieval. *Journal of the American Society for Information Science and Technology* 2016. No 55(11). Pp. 963-969. DOI: <https://doi.org/10.1002/asi.20046>
8. Turban, E., Outland, J., King, D., Lee, J. K., Liang, T. P., & Turban, D. C. *Electronic Commerce 2018: A Managerial and Social Networks Perspective*. Springer, 2018. 640 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58715-8>
9. Baeza-Yates, R., Ribeiro-Neto, B. *Modern Information Retrieval: The Concepts and Technology behind Search*. Addison-Wesley, 2011. URL: <https://web.cs.ucla.edu/~miodrag/cs259-security/baeza-yates99modern.pdf>
10. Grossman, D. A., Frieder, O. *Information Retrieval: Algorithms and Heuristics*. Springer, 2017. URL: <https://archive.org/details/informationretri0002gros>
11. Robertson, S., Zaragoza, H. The Probabilistic Relevance Framework: BM25 and Beyond. *Foundations and Trends in Information Retrieval*, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1561/1500000019>
12. Mikolov, T. et al. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space. arXiv:1301.3781, 2013. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1301.3781>
13. Croft, W. B., Metzler, AD., Strohman, T. *Search Engines: Information Retrieval in Practice*. Addison-Wesley, 2015. URL: <https://pzs.dstu.dp.ua/DataMining/searchWEB/bib/searchBOOK.pdf>
14. Mitra, B., Craswell, N. *Neural Models for Information Retrieval*. Foundations and Trends in Information Retrieval, 2018. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.01509>
15. Laudon, K. C., & Traver, C. G. *E-commerce 2021-2022: business, technology, society*. 16th ed. Pearson, 2021. 912 p. URL: <https://www.pearson.de/media/muster/toc/9781292409320.pdf>
16. Williams, B., Damstra, B., & Stern, D. *Professional WordPress: Design and Development*. 3rd ed. Wiley, 2015. 816 p. URL: <https://jicc.org.il/wp-content/uploads/2016/07/professional-wordpress-design-and-development-3rd-edition.pdf>
17. WooCommerce Documentation. WooCommerce Search Functionality. Automattic, 2023. URL: <https://woocommerce.com/document/>
18. Advanced Woo Search. Official Plugin Documentation. WordPress.org, 2023. URL: <https://wordpress.org/plugins/advanced-woo-search/>

Received (Надійшла) 30.10.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ ABOUT THE AUTHORS

Поворозніук Анатолій Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна;

Anatoly Povoroznyuk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Engineering and Programming, National Technical University “Kharkiv polytechnic institute”, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: ai.povoroznyuk@gmail.com; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0003-2499-2350>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55225664000>.

Поворозніук Оксана Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна;

Oksana Povoroznyuk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Engineering and Programming, National Technical University “Kharkiv polytechnic institute”, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: povoks76@gmail.com; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0001-7524-5641>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55817007400>.

E-commerce information and search system with search relevance assessment

Oksana Povoroznyuk, Anatoly Povoroznyuk

Abstract. Topicality. The paper examines the process of developing an information search system for modern e-commerce solutions. with an assessment of the relevance of search results. Classic search engines, based only on the coincidence of keywords, often do not take into account the context and morphology of queries, synonyms and the weight of individual words, the degree of compliance of the results found with the user's expectations. Therefore, the creation of an intelligent search engine with an assessment of the relevance of search results, which is capable of take into account the user's intentions and adapt to their individual needs. **The subject of study** in the article is methods of increasing the relevance of search results based on the analysis of user queries and ranking of product characteristics. **The purpose of the article** is increasing the efficiency of search in information search systems of electronic commerce by implementing a modified method of relevance assessment. **The following results** were obtained. The features of the formation of user search needs, analysis of relevance assessment models, development and testing of an electronic commerce system with relevance assessment, which showed an improvement in search efficiency indicators, was considered. **Conclusion.** The use of relevance assessment methods for building search systems in the field of electronic commerce is an effective direction for improving the quality of information search services. The results obtained indicate the prospects for further research in the direction of adapting information search models to the specifics of online trading, improving ranking algorithms and integrating machine learning methods for personalizing the delivery of results.

Keywords: e-commerce, search engine, computer system, basic model, relevance, ranking, search efficiency, relevance assessment model.

Dmytro Tyrtysnyi

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

COMPARATIVE ANALYSIS OF AUTOMATED TOOLS FOR CLIENT-SIDE PERFORMANCE TESTING IN MODERN WEB ENVIRONMENTS

Abstract. Relevance. In the era of Single Page Applications (SPA), the traditional approach to performance testing, focusing solely on server response times, is no longer sufficient. The logic of modern web applications has shifted to the client side. However, standard automated tools often produce misleading results under unstable network conditions, failing to capture the true user experience. **Object of research:** The process of testing and analyzing the performance of the client-side of web applications. **Subject of research:** Methods and software tools for automated analysis of web performance metrics. **Purpose of the article:** To conduct a comparative experimental analysis of automated testing tools (Google Lighthouse vs. Sitespeed.io) under constrained network conditions and on real-world e-commerce applications, identifying specific reliability gaps in standard auditing approaches. **Research results:** Experiments on a controlled slow application revealed that Google Lighthouse timed out, reporting a critical "False Positive" (Score 98/100) despite a 50-second load time. Conversely, Sitespeed.io correctly captured the full load duration with high statistical stability (RSD < 10%). Further tests on real-world platforms (Nike, Zara) demonstrated "False Negative" behavior in Lighthouse, which reported inflated LCP values significantly higher than manual observation. **Conclusions:** The analysis confirms that while Lighthouse is useful for general audits, a robust CI/CD framework requires the flexibility of Sitespeed.io to handle custom *pageCompleteChecks*, OS-level controlled network throttling, and complex visual elements without generating misleading pass/fail results.

Keywords: computer system, web performance; Core Web Vitals; Sitespeed.io; Lighthouse; false positives; false negatives; RSD; Visual Progress; UI performance.

Introduction

Problem Statement. The rapid development of web technologies has led to a fundamental paradigm shift in software architecture. With the mass adoption of Single Page Applications (SPA) and Progressive Web Apps (PWA), the primary computational load and rendering logic have shifted from the server side to the client side (browser). In such conditions, traditional performance testing approaches that focus exclusively on Server Response Time (TTFB) or backend throughput are becoming insufficient and often misleading.

User Experience (UX) today depends not on how fast the server sends data, but on how fast the browser can process it, build the DOM tree, and display an interactive interface. The complexity of modern JavaScript frameworks (React, Vue, Angular) creates a situation where a "fast" network request can lead to long blocking of the Main Thread on weak user devices. This directly affects business metrics: conversion rates, user retention, and SEO rankings. However, automated QA instrumentation often fails to keep pace with these changes. Standard auditing tools frequently ignore unstable mobile connectivity conditions (4G/LTE) or complex content loading scenarios, generating "false positive" results, which creates critical risks for the quality of the final product.

Analysis of Recent Research. The issues of client-side optimization and test automation are discussed in a number of modern scientific works. General approaches to optimizing mobile application performance and real-time UI are highlighted in works [1, 2]. The authors emphasize that for modern interfaces, not only load time but also the stability of visual presentation is critical. Research [3] analyzes front-end optimization methods using banking systems as an example, but the focus is shifted to architectural patterns rather than verification tools. Significant attention in the scientific community is

paid to Core Web Vitals metrics. In particular, the Largest Contentful Paint (LCP) metric and the impact of JavaScript bundles and caching strategies on it are analyzed in detail in works [4–6]. The Interaction to Next Paint (INP) metric, which has recently become the standard for assessing interactivity, is considered in study [7]. The authors of work [8] propose a comprehensive framework for improving digital performance based on these metrics.

A separate layer of research concerns instrumentation. Work [9] investigates the correlation between the popularity of e-commerce resources and Google Lighthouse scores, confirming the importance of this tool as an indicator, but not as an absolute measure of quality. The issue of web performance automation is raised in [10], emphasizing the need for accessible tools for a wide range of developers. Works [11, 12] examine the use of modern methods for testing the client side, creating a basis for further comparative analysis.

However, despite the existence of research on individual metrics [5, 7] or general tool overviews [9, 10], the scientific literature does not sufficiently cover the problem of automation tool behavior (Lighthouse vs. Sitespeed.io) under "stress testing" conditions (limited network bandwidth, large media resources). Most studies consider "ideal" scenarios, ignoring the risks of obtaining unreliable data (False Positives/Negatives) during automated regression testing.

Purpose of the Article. The purpose of this work is to conduct a comparative experimental analysis of modern client-side performance automated testing tools (Google Lighthouse and Sitespeed.io). The research aims to identify the limitations of standard auditing tools under unstable network conditions and complex content, analyze mathematical models of visual readiness metrics (Visual Progress), and justify the choice of an architectural solution for building a reliable CI/CD testing system.

1. Theoretical Basis and Mathematical Models

To build an effective testing framework, one must understand the mathematical models behind the metrics.

1.1. Core Web Vitals Models. Cumulative Layout Shift (CLS): Measures visual stability based on impact area and distance fraction:

$$CLS_{shift} = ImpactFraction \times DistanceFraction, \quad (1)$$

Interaction to Next Paint (INP): Measures the full latency of user interaction:

$$INP = InputDelay + ProcessingTime + PresentationDelay, \quad (2)$$

Lighthouse Performance Score (v10): A logarithmic weighted average:

$$Score = 0.30(TBT) + 0.25(LCP) + 0.25(CLS) + 0.10(FCP) + 0.10(SI), \quad (3)$$

Crucially, if a tool stops recording early (timeout), TBT and CLS may be recorded as near-zero, artificially inflating the score.

1.2. Mathematical Model of Visual Completeness.

Visual Completeness is determined by analyzing video frames using histogram intersection. To define these metrics, we first quantify the state of the screen at any given time t .

Let I_t be the video frame (image) captured at time t . The “Visual Complete” feature of Sitespeed use image histograms (frequency distribution of colors) to compare frames because they are robust against small pixel shifts.

- Let $H(I_t)$ be the RGB color histogram of the frame at time t .
- Let t_{start} be the time of the first frame (navigation start).
- Let t_{end} be the time of the final frame when the page has settled (no network/CPU activity for a set duration or any custom script defining this).

We define a Difference Function $D(A, B)$ representing the difference between two frame histograms (typically the Sum of Absolute Differences):

$$D(A, B) = \sum_{i=1}^n |H(A)_i - H(B)_i|, \quad (4)$$

where n is the number of bins in the histogram.

The core component of all “VisualComplete” metrics is the Visual Progress function (5), denoted as $VP(t)$. It represents how close the current frame is to the final frame relative to the starting state.

$$VP(t) = \frac{D(I_{start}, I_{end}) - D(I_t, I_{end})}{D(I_{start}, I_{end})} \times 100\%, \quad (5)$$

- If $VP(t) = 0\%$: The current frame F_t looks exactly like the empty white screen (F_{start}).
- If $VP(t) = 100\%$: The current frame F_t looks exactly like the final loaded page (F_{end}).

VisualComplete[X] (e.g., **75, 85, 95, 99**). This is the first point in time where the Visual Progress $VP(t)$ meets or exceeds the threshold X and **remains** above that threshold for the remainder of the recording.

$$VisualComplete_x = \min\{t | \forall \tau \geq t, VP(\tau) \geq X\}, \quad (6)$$

VisualComplete95: The time t when the page is 95% visually complete.

$$t_{vc95} = \min\{t | VP(t) \geq 95\}, \quad (7)$$

In complex loading scenarios (e.g., a carousel loads, then a pop-up covers it or animated banners), $VP(t)$ might drop temporarily.

The rigorous definition ensures we find the time after which it stays stable above X .

LastVisualChange. This is the timestamp of the final frame update before the page reaches its static, final state. It marks the moment when visual progress hits 100% and stops changing.

$$LastVisualChange = \max\{t | VP(t) \neq VP(t - \delta t)\}, \quad (8)$$

where δt is the duration of a single video frame.

1.3. Statistical Reliability (RSD). To ensure that performance data is not result of network jitter, we calculate the Relative Standard Deviation (RSD), or Coefficient of Variation, across n iterations (where $n=10$ in our experiments):

$$RSD = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\%, \quad (9)$$

where σ is the standard deviation and μ is the mean. An $RSD < 10\%$ indicates a stable, controlled testing environment.

2. Methodology

To ensure a fair comparison, the network environment was standardized for both tools.

2.1. Network Profiles. Strict bandwidth and latency shaping were applied to simulate real-world conditions:

- Mobile 4G: Upload: 9000 kbps / Download: 9000 kbps / RTT: 85ms.
- Desktop 4G: Upload: 9000 kbps / Download: 9000 kbps / RTT: 85ms.
- WiFi 20Mb: Upload: 20 Mbps / Download: 20 Mbps / RTT: 20ms.
- WiFi 50Mb: Upload: 50 Mbps / Download: 50 Mbps / RTT: 20ms.
- Native: Unthrottled (~800 Mbps).

2.2. Tools & Configuration:

- Throttling Engine: Both tools utilized the “@sitespeed.io/throttle” npm package for machine-level packet shaping. This ensures that observed differences are due to the analysis engines, not the throttling method.
- Google Lighthouse: Chrome DevTools (v143) in Mobile and Desktop modes.
- Sitespeed.io (v39.2): Docker container with video and visualMetrics enabled. Configured for 10 iterations per run to calculate median values.

3. Experiment A: The "False Positive" (Controlled App)

Object: An unoptimized web application with large images (~10MB each) designed to load in approximately 50 seconds on a 4G network.

Lighthouse Results: Lighthouse reported a Performance Score (3) of 98/100 and an LCP of 1.5s. The report included an error: “The page loaded too slowly to finish within the time limit” (Fig. 1). Because the large images were slow to load, Lighthouse effectively timed out, analyzed only the initial header, which loaded fast, and ignored the rest of the page.

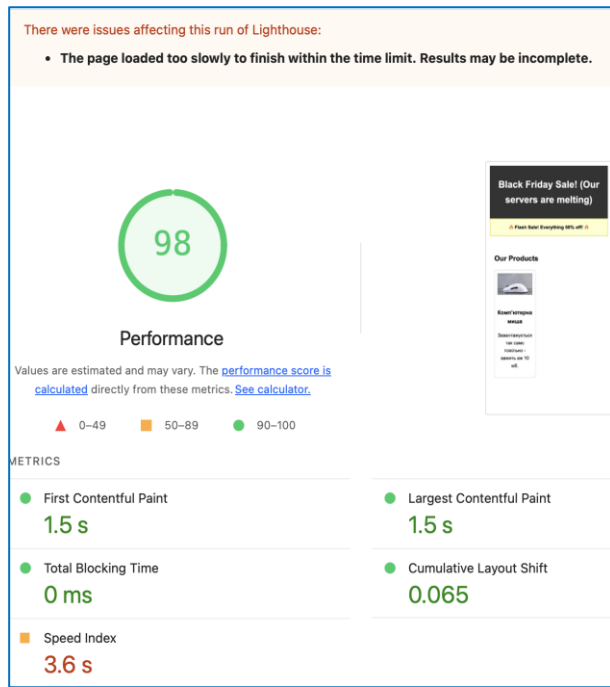


Fig. 1. Google Lighthouse falsely reporting a high score (98) because the test timed out before the heavy assets loaded

Sitespeed.io Results: Sitespeed.io was configured with a custom start flag: `--pageCompleteCheck: "return document.querySelectorAll("#product-grid.product-card").length >= 9"`, waited for the product grid to populate (Fig. 2). It correctly reported `LastVisualChange`: 49.1s (8). Crucially, the statistical stability was high: the RSD (9) was < 10% across 10 iterations, proving the data was reliable.

Metric	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Median	Mean	stddev
Largest Contentful Paint	1.036 s	916 ms	852 ms	1.020 s	884 ms	1.000 s	1.068 s	848 ms	952 ms	984 ms	984 ms	966 ms	70 ms
Interaction to Next Paint	440 ms	464 ms	432 ms	480 ms	424 ms	432 ms	504 ms	424 ms	528 ms	432 ms	436 ms	456 ms	35 ms
Last Visual Change	49.000 s	49.007 s	49.972 s	49.411 s	49.951 s	49.273 s	49.033 s	49.000 s	49.411 s	49.411 s	49.342 s	49.313 s	293 ms
Speed Index	6.154 s	5.581 s	5.585 s	5.524 s	5.581 s	5.447 s	5.730 s	5.170 s	5.333 s	5.526 s	5.539 s	5.560 s	245 ms
Visual Readiness	47.967 s	48.134 s	49.088 s	48.369 s	48.539 s	48.268 s	47.966 s	48.133 s	48.437 s	48.403 s	48.319 s	48.330 s	313 ms
Visual Complete 95	16.833 s	40.700 s	13.258 s	13.781 s	13.484 s	13.609 s	40.667 s	13.967 s	13.378 s	14.184 s	13.874 s	19.386 s	10.693 s
Visual Complete 99	48.967 s	49.033 s	49.938 s	49.378 s	49.517 s	49.240 s	49.000 s	48.967 s	49.378 s	49.378 s	49.309 s	49.280 s	292 ms

Fig. 2. Sitespeed.io correctly capturing the 49-second load time. Note the `VisualComplete95` is 13.9s, indicating the user saw most content early, but the page was not fully finished

3.1. Analysis of Visual Progress. To understand the discrepancy, we analyzed the Visual Progress graph generated by Sitespeed.io (Fig. 3).

The curve shows a "stepped" progression. Lighthouse only captured the initial step (0-2s), while Sitespeed.io tracked the full progression to 100% at ~50s. The graph shows that the interface was ~97% complete for a long duration (15s–45s), whereas the histogram analysis in Sitespeed.io correctly identified that the final state had not yet been reached.

Additionally, the test was conducted on a Desktop viewport with the same 4g connection. In the Desktop Visual Progress Graph (Fig. 4) we could observe more gradual content visualisation on the page.

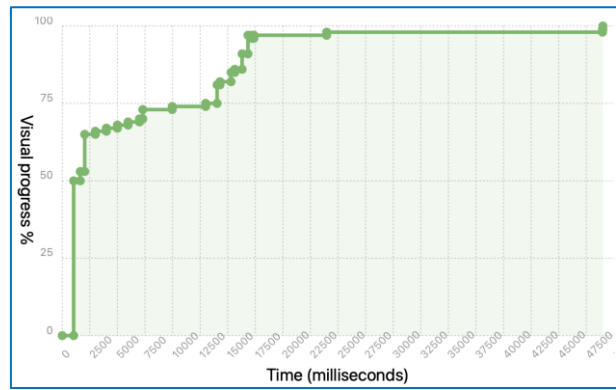


Fig. 3. Visual Progress Graph (VP(t)) - 4G - Mobile

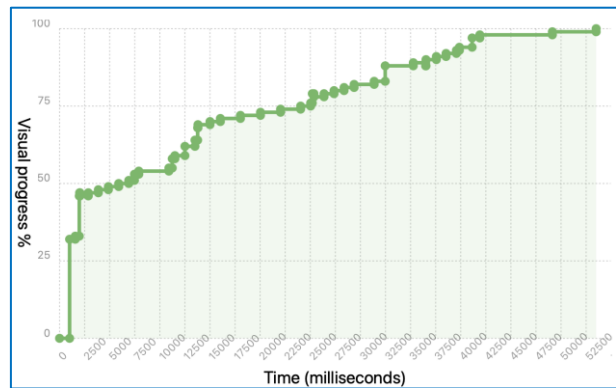


Fig. 4. Visual Progress Graph (VP(t)) - 4G - Desktop

The reason for that is the bigger viewport and more slow images (main bottleneck) of the slow web app impact the visible part of the screen more on Desktop, than on Mobile. Extra information for the Visual Progress could be also found in the "Filmstrip" section of the Sitespeed report, there we could see screenshots of the app at different moments of the test execution (Fig. 5).



Fig. 5. Page Visualisation Progress (Filmstrip) - 4G - Desktop.

3.2. Impact of Network Conditions. We extended the experiment to faster networks to see if the tools converged (Tabl. 1, 2). Comparative Analysis:

1. Metric Accuracy: On the "Desktop WiFi 50Mb" profile, Sitespeed reported an LCP of 3.3s, which aligned with manual observation. Lighthouse reported an LCP of 10s. This discrepancy suggests that Lighthouse (in DevTools) may struggle with LCP timing identification.

2. Scaling: Sitespeed.io results scaled logically with bandwidth (LCP dropped from 13.4s → 1.3s as network improved). Lighthouse results were inconsistent, with LCP remaining high (10s) even on

Native networks, potentially indicating a bug in the specific version or interference from browser extensions/overhead not present in the isolated Docker container.

3. VisualMetrics are available for the Sitespeed.io only, limiting the capabilities of the Lighthouse to analyse page rendering speed of the web sites under such constrained conditions.

4. Diagnostic Parity: Despite the metric differences, both tools correctly identified the "Opportunities" for optimization: "Properly size images" and "Serve images in next-gen formats."

Table 1 – Sitespeed Results (Median of 10 runs, RSD <10%)

Testing setup	LCP	VisualComplete95	LastVisualChange
Mobile - 4g (up:9000 down:9000 rtt:85)	1 sec (LCP is a <h1> on mobile, instead of img, which is loading very slowly)	13.8 sec (since viewport is smaller than on desktop)	49 sec
Desktop - 4g (up:9000 down:9000 rtt:85)	13.4 sec	40.7 sec	53 sec
Desktop - Wifi 20Mb (up:20000 down:20000 rtt:20)	6.3 sec	20.3 sec	24.9 sec
Desktop - Wifi 50Mb (up:50000 down:50000 rtt:20)	3.3 sec	8.8 sec	11.1 sec
Desktop Native - 800 Mbps	1.3 sec	2.65 sec	3.3 sec

Table 2 – Lighthouse Results (Manual runs)

Testing setup	LCP	SpeedIndex (Performance score)
Mobile - 4g (up:9000 down:9000 rtt:85)	1.5 sec (LCP is a h1 on mobile, instead of img, which is loading very slowly)	3.6 sec (98) with the error
Desktop - 4g (up:9000 down:9000 rtt:85)	13.3 sec	6.8 sec (63)
Desktop - Wifi 20Mb (up:20000 down:20000 rtt:20)	10 sec	2 sec (71)
Desktop - Wifi 50Mb (up:50000 down:50000 rtt:20)	10 sec (much higher than in Sitespeed and real-life. In reality the LCP img has been loaded in 3-4 sec)	1.3 sec (74)
Desktop - Native - 800 Mbps	10 sec (looks like a bug with LCP in Lighthouse with some Websites)	2.65 sec

Additionally, the Sitespeed gives an opportunity to watch the network requests waterfall and match it with the Visual metrics (Fig. 6). The correlation between sluggish load of .png images and slow LCP and Visual metrics (6,9) is obvious.

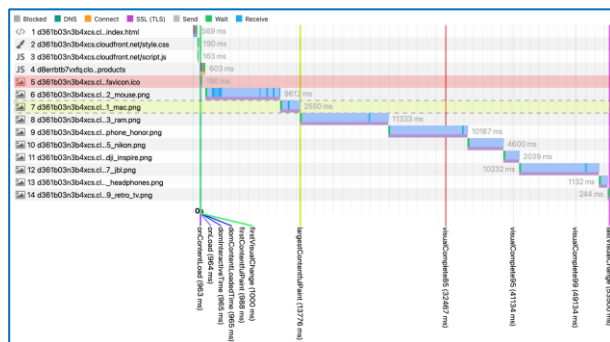


Fig. 6. Network requests waterfall - 4G - Desktop

Comparing this to the waterfall of the test with 800Mbps cable network, we could see that the resources

download happens much faster by the browser, which leads to better Visual metrics (Fig. 7).

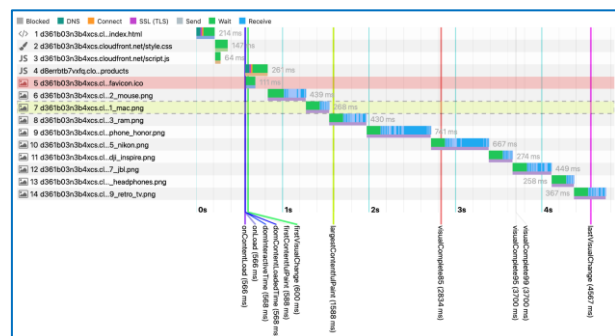


Fig. 7. Network requests waterfall - Native - Desktop.

4. Experiment B: Real-World E-Commerce Analysis

To validate these findings, we tested popular e-commerce platforms (Nike, Zara, Rozetka) under the same 4G Mobile conditions (Tabl. 3).

Table 3 – Comparison of Real-World Metrics between Sitespeed and Lighthouse.

URL tested	LCP (Sitespeed)	LCP (Lighthouse)	VisualComplete95(7)
https://www.nike.com/	4.9 sec	16.2 sec - inaccurate (real ~5 sec)	10.3 sec*
https://www.zara.com/ua/uk/s-man-sale-110847.html	5.6 sec	19.6 sec – inaccurate (real ~5-6 sec)	9.9 sec*
https://rozetka.com.ua/ua/notebooks/c80004/	1.2 sec	2.3 sec	1.7 sec

4.1. The "False Negative" Phenomenon. On Nike.com, manual observation confirmed the main content loaded in 4-5 seconds.

- Sitespeed.io: Reported LCP of 4.9s, accurately reflecting reality (Fig. 8).
- Lighthouse: Reported LCP of 16.2s. This demonstrates a False Negative - Lighthouse flagged a performant site as slow (Fig. 9), likely misidentifying the LCP candidate element during the load process. A similar issue occurred with Zara.com (19.6s reported vs 5-6s real).

URL	Last Visual Change	Visual Complete 95	First Visual Change	First Contentful Paint	Largest Contentful Paint	Cumulative Layout Shift	Total Transfer Size	Total Requests
https://www.nike.com/	11366	10396	1805	1792	4904	0.0056	4880.2	252
https://www.zara.com/ua/uk/s-man-sale-110847.html?y1=2438352	10074	9972	1867	1676	5668	0.0126	4886.2	139
https://rozetka.com.ua/ua/notebooks/c80004/	3017	1750	1242	1212	1212	0	2754.8	406

Fig. 8. Sitespeed – LCP and other metrics for Experiment B

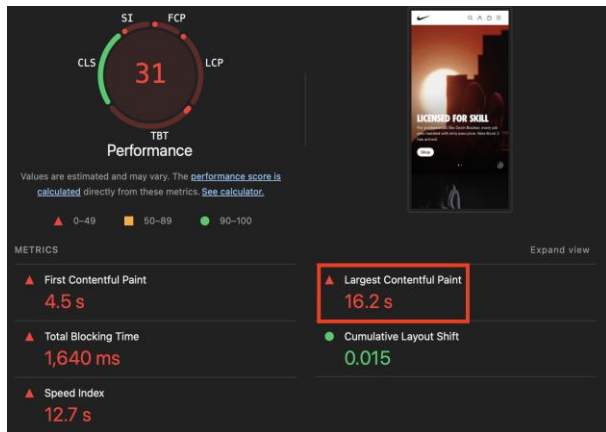


Fig. 9. Lighthouse – LCP and other metrics for Nike

4.2. The Challenge of Animation. While Sitespeed.io was more accurate, it highlighted a specific challenge with VisualComplete. On Nike.com, an animated banner caused the VisualComplete95 (7) metric to be 10.3s, even though the site was interactive much earlier.

The histogram analysis ($VP(t)$) interpreted the animation as "unfinished loading" (Fig. 10).

Solution: This proves the advantage of Sitespeed's flexibility. By analyzing the generated Filmstrip or configuring a custom `pageCompleteCheck` to ignore the banner, we can obtain the true metric. Lighthouse does not offer this granular control.

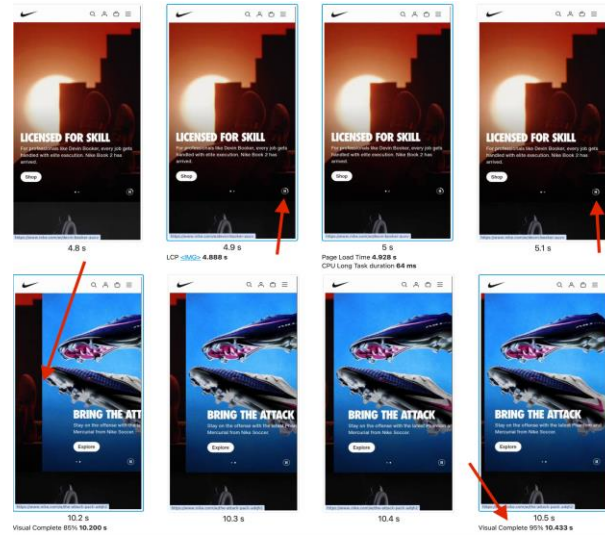


Fig. 10. Animated banner, impacting VisualComplete metrics

4.3. Statistical Validity (RSD):

- Nike/Rozetka: RSD (9) was ~10%, indicating stable test conditions.
- Zara: RSD (9) was ~25%. This high deviation indicates that the instability lies within the Zara application itself (e.g., variable API response times), not the tool. Sitespeed's ability to report RSD is critical for distinguishing between "tool noise" and "platform instability."

Conclusions

A comparative experimental analysis of methods and tools for automated client-side performance testing was conducted under constrained network conditions on controlled unoptimized web application and on real-world e-commerce applications. This result will expand the possibilities of designing robust continuous integration (CI/CD) systems capable of detecting performance regressions in complex web environments without generating false positive validation results.

Experimental data confirmed that, compared to standard auditing tools (such as Google Lighthouse) which demonstrated "False Positive" results (Score 98 vs 50s load time) and "False Negatives" (inflated LCP values), the Sitespeed.io framework significantly increases the reliability of quality control. The obtained high statistical validity (RSD < 10% across 10 iterations) and the accurate capture of Visual Progress metrics allow for the precise identification of "bottlenecks" that are invisible to standard timeout-based algorithms.

Furthermore, the architectural flexibility of the Sitespeed.io engine, specifically the ability to implement custom completion logic (`pageCompleteCheck`) and analyze histogram-based visual metrics, allows it to be integrated as the core component of a comprehensive

automated testing framework with historical data aggregation, which is the primary objective of further research.

Use of Artificial Intelligence Tools. The author confirm that artificial intelligence technologies were not used in the creation of the presented work.

REFERENCES

1. G. C. Veghini, "Real-time Performance Optimization in Modern UI Applications," *2025 3rd International Conference on Intelligent Cyber Physical Systems and Internet of Things (ICoICI)*, Coimbatore, India, 2025, pp. 528-533, doi: <https://doi.org/10.1109/ICoICI65217.2025.11252913>
2. Hort, M., Kechagia, M., Sarro, F. and Harman, M. (2021), "A Survey of Performance Optimization for Mobile Applications", *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 47, no. 8, pp. 1–26, doi: <https://doi.org/10.1109/TSE.2021.3071193>
3. Ericsson, T. (2013), "Front-end website performance optimisation: Optimising the front-end performance of Swedbank's website", Dissertation, *DIVA Portal*, URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:645641/FULLTEXT01.pdf>
4. Edgar, M. (2023), "Largest Contentful Paint", in *Speed Metrics Guide: Choosing the Right Metrics to Use When Evaluating Websites*, Apress, Berkeley, CA, pp. 137–152, doi: https://doi.org/10.1007/979-8-8688-0155-6_8
5. Д. А. Тиртишний, С. Ю. Леонов (2024), "Вплив JavaScript-бандлів на метрику Largest Contentful Paint (LCP) та рекомендації щодо оптимізації", *NTU "KhPI" Repository*, URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/50f96f0a-f773-4ebb-b852-d76e080efc3a>.
6. Д. А. Тиртишний, С. Ю. Леонов (2024), "Стратегії кешування контенту для оптимізації LCP у динамічних веб-додатках", *NTU "KhPI" Repository*, URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/f429dd8c-f97d-42f9-843a-dad89ec7c4b5>.
7. Д. А. Тиртишний, С. Ю. Леонов (2024), "INP як метрика оцінки взаємодії користувача з вебсторінкою", *NTU "KhPI" Repository*, URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/6c41404c-1df4-409a-a6a8-a8661b44e7c4>.
8. Ranjith Reddy Gaddam (2025), "Optimizing Core Web Vitals: A Comprehensive Framework for Enhanced Digital Performance", *Sarcouncil Journal of Engineering and Computer Science*, pp. 704–711, URL: <https://sarcouncil.com/download-article/SJECS-218 - 2025-704-711.pdf>.
9. Thomas, I. (2024), "The Correlation of the Popularity of E-commerce Websites and the 6 Metrics of the Lighthouse Performance Score", *Furman University Scholar Exchange*, URL: <https://scholarexchange.furman.edu/scjas/2024/all/478/>.
10. Marx, R. (2018), "Web Performance Automation for the People", in *Companion Proceedings of the The Web Conference 2018 (WWW '18)*, ACM, New York, NY, USA, pp. 825–829, doi: <https://doi.org/10.1145/3184558.3186570>.
11. Д. А. Тиртишний, С. Ю. Леонов (2024), "Використання сучасних методів тестування та аналізу клієнтської частини веб-додатків", *NTU "KhPI" Repository*, URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/c4f8bf52-2684-43d2-a2ae-6aa1b64b1923>.
12. Leonov, S., Tyrtysnyi, D. (2025), "Development of a software platform for testing the performance of the client part of a web application", *Control, Navigation and Communication Systems*, Vol. 1, No. 79, pp. 111–115. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.111-115>

Received (Надійшла) 07.01.2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Тиртишний Дмитро Андрійович – аспірант, Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та інформаційних технологій, кафедра Комп'ютерна інженерія та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Dmytro Tyrtysnyi – PhD student, Postgraduate, Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: dmytro.tyrtysnyi@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0000-4935-7156>;

Порівняльний аналіз автоматизованих інструментів для тестування продуктивності клієнтської частини в сучасних веб-середовищах

Д. А. Тиртишний

Анотація. Актуальність. В епоху односторінкових додатків (SPA) традиційний підхід до тестування продуктивності, що фокусується виключно на часі відповіді сервера, більше не є достатнім. Логіка сучасних веб-додатків змістилася на клієнтську частину. Однак стандартні автоматизовані інструменти часто дають хибні результати в умовах нестабільної мережі, не відображаючи справжній досвід користувача. **Об'єкт дослідження:** процес тестування та аналізу продуктивності клієнтської частини веб-додатків. **Предмет дослідження:** методи та програмні засоби для автоматизованого аналізу метрик веб-продуктивності. **Мета статті:** провести порівняльний експериментальний аналіз інструментів автоматизованого тестування (Google Lighthouse проти Sitespeed.io) в умовах обмеженої пропускної здатності мережі та на реальних додатках електронної комерції, ідентифікувавши специфічні прогалини в надійності стандартних підходів до аудиту. **Результати дослідження:** Експерименти на контрольованому додатку зі сповільненою мережею виявили, що Google Lighthouse переривався через таймаут, видаючи критичний «хибно-позитивний» результат (оцінка продуктивності 98/100), незважаючи на 50-секундний час завантаження сторінки. Натомість Sitespeed.io коректно зафіксував повну тривалість завантаження з високою статистичною стабільністю (RSD < 10%). Подальші тестування на реальних платформах (Nike, Zara) продемонстрували «хибно-негативну» поведінку Lighthouse, який звітував про завищені значення LCP, що значно перевищували результати ручного спостереження. **Висновки:** Аналіз підтверджує, що хоча Lighthouse є корисним для загальних аудитів, побудова надійного фреймворку CI/CD вимагає гнучкості Sitespeed.io для обробки специфічних умов завершення завантаження сторінки (pageCompleteChecks), керованого обмеження мережі на рівні ОС та складних візуальних елементів без генерації оманливих результатів проходження тестів.

Ключові слова: комп'ютерна система, веб-продуктивність; Core Web Vitals; Sitespeed.io; Lighthouse; хибно-позитивні результати; хибно-негативні результати; RSD; Visual Progress; продуктивність UI.

В. В. Челак, О. А. Горносталь

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ПОБУДОВИ ДЕРЕВ З БАГАТОВИМІРНИМИ ВУЗЛАМИ РІШЕНЬ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАНУ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Анотація. Об'єктом дослідження є процес ідентифікації стану комп'ютерних систем на основі аналізу багатовимірних даних їх функціонування. Предметом дослідження є методи побудови дерев рішень із багатовимірними вузлами та алгоритми оптимізації їх структури для задач класифікації станів комп'ютерних систем. Метою дослідження є розробка та дослідження удосконаленого методу побудови дерев з багатовимірними вузлами рішень, який забезпечує підвищення точності та узагальнюючої здатності моделей ідентифікації стану комп'ютерних систем у складних і невизначених умовах. **Методи, що використовуються:** методи машинного навчання, деревні моделі класифікації, процедури нелінійного розділення простору, ітераційна оптимізація параметрів на основі зсування області пошуку, підходи до оцінювання якості класифікації. **Отримані результати:** розроблено процедуру автоматизованого вибору типу гіперфігури у вузлі дерева, що дозволяє адаптувати форму розділення до локальної структури даних. Показано, що використання узагальнених поверхонь зменшує необхідну глибину дерева та скорочує кількість послідовних поділів. В експериментальних дослідженнях встановлено підвищення показників Accuracy, Precision, Recall, F1-score та MCC у порівнянні з класичними деревами рішень і моделями з фіксованою геометрією вузлів. **Висновки:** запропонований метод забезпечує більш точне та стабільне моделювання меж між станами комп'ютерних систем, зберігаючи інтерпретованість прийнятих рішень і прийнятний рівень обчислювальних витрат. Отримані результати підтверджують доцільність використання адаптивних багатовимірних вузлів у системах моніторингу та інформаційної безпеки.

Ключові слова: ідентифікація стану, комп'ютерні системи, дерево рішень, багатовимірний вузол, нелінійне розділення, вирішальне правило, машинне навчання.

Вступ

Сучасні комп'ютерні системи характеризуються високим рівнем складності, гетерогенністю компонентів та динамічністю процесів, що в них відбуваються. Вони інтегрують апаратні, програмні та мережеві підсистеми, які взаємодіють між собою в режимі реального часу та функціонують в умовах постійних змін навантаження, конфігурації й зовнішніх впливів. За таких умов зростає ймовірність виникнення нештатних режимів роботи, прихованих відмов, деградації продуктивності або аномальної поведінки, зумовленої як внутрішніми збоями, так і цілеспрямованими атаками. Тому задача своєчасної та достовірної ідентифікації стану комп'ютерних систем є однією з ключових у сфері інформаційної безпеки, системного моніторингу та управління надійністю.

Традиційні підходи до оцінювання стану комп'ютерних систем, що ґрунтуються на жорстко заданих правилах, порогових значеннях або класичних статистичних моделях, мають обмежену ефективність у складних і слабко формалізованих умовах. Такі методи, як правило, потребують точного визначення меж між нормальними та аномальними станами, що не завжди можливо через стохастичний характер системних процесів, наявність шумів у вимірюваних даних та неповноту інформації. Крім того, із зростанням кількості контрольованих параметрів суттєво ускладнюється побудова універсальних правил, здатних адекватно описувати поведінку системи в усіх режимах її функціонування.

Огляд пов'язаних наукових публікацій. У роботі [1] запропоновано підхід до виявлення кіберзагроз, що поєднує попередню фільтрацію подій на основі правил та двоетапну модель машинного навчання. На першому етапі здійснюється відбір подій із

використанням інформації про відомі вразливості та класифікацію атак, що дозволяє зменшити обсяг даних для подальшого аналізу. Другий етап передбачає застосування моделей машинного навчання для ідентифікації аномальної поведінки. Особливістю підходу є врахування додаткового контексту подій, зокрема джерела, середовища виконання та мережевих характеристик, що підвищує точність атрибуції загроз. Запропоноване рішення забезпечує зменшення обчислювальних витрат і покращення показників точності класифікації. Водночас використані методи класифікації базуються на класичних механізмах поділу простору ознак, що обмежує їх ефективність у випадках складних нелінійних залежностей та перекривання станів комп'ютерних систем.

У роботах [2, 3] розглянуто підходи до автоматизованої ідентифікації кіберзагроз на основі аналізу відкритих інформаційних джерел та потокових даних у режимі реального часу. Автори [2] запропонували комплексну архітектуру, що поєднує методи машинного та глибинного навчання з тематичним аналізом текстових даних для виявлення відомих і нових типів загроз, зокрема атак нульового дня. У роботі [3] основну увагу приділено напівкеруваному навчанню в умовах обмеженої кількості розмічених даних, де поєднання генеративних моделей і контрастного навчання дозволяє підвищити якість класифікації загроз. Незважаючи на високу ефективність запропонованих підходів у задачах аналізу текстових потоків та інтелектуальної обробки відкритих даних, вони орієнтовані переважно на семантичну інтерпретацію інформаційних повідомлень і не враховують особливостей багатовимірних телеметричних даних комп'ютерних систем, що обмежує їх застосування для безпосередньої ідентифікації станів систем на основі показників їх функціонування.

У роботах [4-6] досліджуються сучасні підходи до виявлення та ідентифікації кіберзагроз із використанням методів штучного інтелекту в різних класах складних кіберфізичних і мережевих систем. У дослідженні [4] запропоновано структурований підхід до проектування систем виявлення вторгнень для SCADA-середовищ, що включає попередню обробку даних, балансування вибірок, автоматизований відбір ознак та порівняльний аналіз моделей машинного навчання, де найвищі результати продемонстрували ансамблеві методи. Робота [5] має оглядовий характер і систематизує напрями застосування штучного інтелекту в кібербезпеці, підкреслюючи зростаючу роль алгоритмів аналізу аномалій та інтелектуальної обробки багатовимірних даних для підвищення адаптивності систем захисту. У [6] розглянуто автоматизований фреймворк ідентифікації загроз у мережах взаємодії транспортних засобів і дорожньої інфраструктури, де глибинні моделі використовуються для виявлення прихованих шаблонів і класифікації типів атак. Водночас спільною рисою наведених підходів є орієнтація на складні нейромережеві або ансамблеві моделі з обмеженою інтерпретованістю, що ускладнює їх використання в задачах пояснюваної ідентифікації станів комп'ютерних систем та обґрунтовує доцільність подальших досліджень у напрямі розвитку інтерпретованих деревних моделей з багатовимірними вузлами рішень.

У роботах [7-10] розглянуто методи виявлення аномалій і кіберзагроз у складних розподілених середовищах із використанням машинного навчання та аналізу великих обсягів даних. Дослідження [7] зосереджене на задачі виявлення внутрішніх загроз у незбалансованих вибірках, де застосування щільнісних методів аналізу дозволяє ефективно ідентифікувати рідкісні аномальні стани. У роботі [8] запропоновано інтелектуальну архітектуру захисту середовищ Інтернету речей, що поєднує класифікаційні моделі машинного навчання з обчисленнями на периферії мережі для підвищення точності та оперативності виявлення атак. У [9] розглянуто превентивний підхід до виявлення аномалій і управління ризиками в бездротових комунікаційних системах, де акцент зроблено на аналізі часових і поведінкових характеристик у реальному часі. Робота [10] присвячена автоматизованій ідентифікації нових кіберзагроз на основі аналізу текстових потоків із відкритих джерел та їх подальшій класифікації за цілями і рівнем ризику. Водночас наведені підходи орієнтовані або на окремі аспекти аномальної поведінки, або на специфічні класи даних, що ускладнює їх безпосереднє використання для комплексної ідентифікації станів комп'ютерних систем у багатовимірному просторі параметрів і підкреслює актуальність розвитку інтерпретованих моделей, здатних враховувати взаємозв'язки між множиною ознак.

У роботах [11-14] методи машинного навчання застосовуються для ідентифікації станів і аномальних режимів у різномірних інформаційних та кіберфізичних системах, що характеризуються багатовимірністю та високою динамікою даних. Дослідження [11] присвячене задачі виявлення та розпізнавання безпілотних

апаратів на основі аналізу акустичних сигналів, де класифікація здійснюється з урахуванням складного впливу фонових факторів, що підкреслює важливість моделювання взаємозалежних ознак. У роботі [12] систематизовано підходи до забезпечення конфіденційності в інтерфейсах «мозок-комп'ютер», акцентуючи увагу на ризиках, пов'язаних з обробкою чутливих багатовимірних сигналів, та необхідності побудови адаптивних і контрольованих моделей аналізу. У [13] і [14] розглянуто методи виявлення атак підвищення привілеїв і кіберзагроз у хмарних та IoT-середовищах із використанням ансамблевих і оптимізаційних алгоритмів, орієнтованих на досягнення високої точності класифікації. Водночас зазначені підходи ґрунтуються переважно на складних комбінованих моделях, що ускладнює інтерпретацію результатів і не завжди дозволяє явно описати логіку прийняття рішень у багатовимірному просторі ознак, що є критично важливим для задач пояснюваної ідентифікації станів комп'ютерних систем.

У попередніх дослідженнях авторів було закладено теоретичні та методологічні основи застосування дерев рішень із багатовимірними вузлами для задач ідентифікації стану комп'ютерних систем. У роботі [15] запропоновано підхід до формування багатовимірних областей прийняття рішень, що дозволив перейти від ортогональних розділень простору ознак до більш гнучкого опису меж між класами. Подальший розвиток цієї ідеї отримано в дослідженнях [16], де для налаштування структури дерева та параметрів вузлів застосовано метаевристичну оптимізацію, що сприяло підвищенню узагальнюючої здатності моделей. У роботах [17] увагу зосереджено на проблемі дисбалансу навчальних даних під час класифікації атак, що дозволило адаптувати деревні моделі до умов нерівномірного представлення станів та зменшити кількість помилок для міноритарних класів.

Важливим напрямом розвитку стало вдосконалення процедур оцінювання якості класифікації та інтеграція ансамблевих механізмів прийняття рішень. У роботі [18] запропоновано розширений апарат аналізу ефективності моделей на основі багатовимірного подання матриці помилок і ROC-орієнтованих характеристик, що забезпечило більш глибоке розуміння поведінки класифікаторів у задачах із високою ціною помилки. Подальше поєднання дерев з багатовимірними вузлами та нечіткої логіки реалізовано в дослідженні [19], де стекінгова організація ансамблю дозволила підвищити стабільність і точність ідентифікації станів у складних умовах невизначеності. Отримані результати сформували підґрунтя для подальших досліджень, спрямованих на удосконалення методів побудови самих багатовимірних вузлів та підвищення адаптивності деревних структур до внутрішньої геометрії даних.

З огляду на це актуальною науковою задачею є подальший розвиток методів побудови дерев з багатовимірними вузлами рішень шляхом удосконалення алгоритмів формування таких вузлів, підвищення їх адаптивності до структури даних та зменшення чутливості до шумових впливів. Особливого значення

набуває створення підходів, здатних ефективно працювати з великими масивами телеметричних і системних даних, що описують функціонування комп'ютерних систем у реальних умовах експлуатації.

Постановка проблеми. У цій роботі пропонується удосконалений метод побудови дерев з багатовимірними вузлами рішень, орієнтований на підвищення точності ідентифікації стану комп'ютерних систем. Запропонований підхід спрямований на більш адекватне моделювання складних областей розділення у багатовимірному просторі ознак та врахування внутрішньої структури даних під час формування вузлів дерева. Удосконалення методу полягає у зміні процедури пошуку параметрів багатовимірних вузлів, що дозволяє зменшити класифікаційну помилку та підвищити стійкість моделі до варіацій вхідних даних.

Об'єктом дослідження є процес ідентифікації стану комп'ютерних систем на основі аналізу багатовимірних даних їх функціонування.

Предметом дослідження є методи побудови дерев рішень із багатовимірними вузлами та алгоритми оптимізації їх структури для задач класифікації станів комп'ютерних систем.

Метою роботи є розробка та дослідження удосконаленого методу побудови дерев з багатовимірними вузлами рішень, який забезпечує підвищення точності та узагальнюючої здатності моделей ідентифікації стану комп'ютерних систем у складних і невизначених умовах.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких основних завдань:

1. Аналіз обмежень існуючих підходів до побудови дерев з багатовимірними вузлами;
2. Розробку удосконаленого алгоритму формування вузлів рішень з урахуванням структури даних;
3. Експериментальну оцінку ефективності запропонованого методу на реальних наборах даних, що описують нормальні та аномальні стани комп'ютерних систем;
4. Порівняння отриманих результатів з класичними деревними методами та раніше запропонованими підходами.

Реалізація цих завдань дозволить обґрунтувати доцільність застосування удосконаленого методу та визначити перспективи його подальшого розвитку і практичного використання.

Удосконалений метод побудови дерев з багатовимірними вузлами рішень

Як модифікацію раніше запропонованого підходу [15] пропонується розширити спосіб формування багатовимірних вузлів шляхом використання різних типів гіперфігур, не обмежуючись лише гіперсферичними областями. Такий підхід забезпечує більш гнучке моделювання меж між класами у просторі ознак та дозволяє точніше відобразити реальну структуру розподілу даних.

Застосування узагальнених геометричних форм потенційно дає змогу зменшити кількість вузлів і глибину дерева, оскільки складні області можуть бути описані меншою кількістю розділень. Це, у

свою чергу, сприяє підвищенню узагальнюючої здатності моделі та покращує інтерпретованість прийнятих рішень за рахунок формування компактнішої структури класифікатора.

Водночас підвищення гнучкості опису супроводжується зростанням обчислювальної складності етапу навчання. Пошук оптимального вигляду гіперфігури та визначення її параметрів стають значно складнішими порівняно з випадком гіперсфери, для якої необхідно оцінити лише координати центру та радіус. Для складніших моделей меж розділення, зокрема поліноміальних або квадратичних поверхонь, кількість параметрів суттєво зростає, що призводить до ускладнення процедури оптимізації та збільшення часу навчання.

Таким чином, запропоноване удосконалення передбачає компроміс між точністю опису багатовимірного простору ознак і витратами на побудову моделі, що потребує розробки ефективних алгоритмів пошуку параметрів та стратегій обмеження складності гіперфігур.

В роботі використовуються такі рівняння:

1. Гіперплощина (1):

$$P(X, 1) \equiv \left(\sum_{i=1}^N a_i x_i + d \leq 0 \right). \quad (1)$$

2. Гіперсфера (2):

$$P(X, 2) \equiv \left(\sum_{i=1}^N (x_i - c_i)^2 \leq r^2 \right). \quad (2)$$

3. Гіпереліпсоїд (3):

$$P(X, 3) \equiv \left(\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - c_i)^2}{a_i^2} \leq 1 \right). \quad (3)$$

4. Параболоїд (4):

$$P(X, 4) \equiv \left(x_N - \sum_{i=1}^{N-1} a_i x_i^2 - d \leq 0 \right). \quad (4)$$

5. Поліноміальна крива (5):

$$P(X, 5) \equiv \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ji} x_i^j + d \leq 0 \right). \quad (5)$$

де: X – об'єкт що описується сукупністю ознак x_i в гіперпросторі; k – індекс рівняння з множини $\{1, 2, 3, 4, 5\}$; $P(X, k)$ – предикат; a_i, d, r, c_i – параметри рівнянь, що зберігаються незалежно один від одного в системі; N – кількість ознак; M – ступінь поліному.

Процедура формування багатовимірного вузла передбачає автоматизований вибір типу розділяючої гіперфігури, яка найкраще відображає локальну структуру даних та забезпечує мінімальне значення функції помилки класифікації $E(A)$.

$$E(A) = \sum_{i=1}^N [y_i \neq t_i]'; \quad (6)$$

$$[y_i \neq t_i]' = \begin{cases} 1.5, & y_i \neq t_i \cap t_i = 1; \\ 1, & y_i \neq t_i \cap t_i = 0; \\ 0, & y_i = t_i. \end{cases} \quad (7)$$

Крок 1. Формування підвибірки вузла. Із навчальної множини виділяється підмножина зразків TS_v , що потрапили до поточного вузла дерева відповідно до рішень попередніх розділень.

Крок 2. Ініціалізація набору моделей-кандидатів. Задається множина можливих типів рівнянь $\Theta = \{HPlane, HSph, Heli, HPara, HPoly\}$.

Крок 3. Вибір розмірності на просторі. Правила вибору базуються на використанні на основі методу кореляційних плеяд – обчислюється повна матриця кореляційних коефіцієнтів, будується граф, в якому ребра відображають в якості вагів абсолютні значення кореляційних коефіцієнтів та проводиться фільтрація розроблених методів. Після чого визначається потенційні багатовимірні ознаки.

Крок 4. Оцінювання параметрів кожного типу. Для кожної фігури $\theta_k \in \Theta$ виконується процедура підбору параметрів (A, C, r, d) у поточному вузлі.

Безпосередній перебір параметрів у багатовимірному просторі є обчислювально складною задачею, оскільки кількість можливих комбінацій експоненційно зростає зі збільшенням числа ознак та порядку рівняння. Тому в запропонованому методі використовується ітераційна процедура спрямованого звуження області пошуку, що базується на принципі дихотомії.

Крок 4.1. Ініціалізація інтервалів. Для кожного параметра задається початковий діапазон допустимих значень

$$p_j \in [L_j, U_j]. \quad (8)$$

Межі визначаються на основі статистичних характеристик підвибірки (мінімальних, максимальних значень та дисперсії).

Крок 4.2. Обчислення центральної точки. На поточній ітерації для кожного параметра визначається середина інтервалу:

$$p_j^{mid} = \frac{L_j + U_j}{2}. \quad (9)$$

На основі отриманого набору параметрів формується кандидатна гіперфігура та виконується розділення зразків.

Крок 4.3. Оцінювання якості. Для сформованого розділення розраховується значення функції помилки $E(A)$

Крок 4.4. Звуження області пошуку. Для кожного параметру визначається напрям покращення. Якщо зміщення параметру в одну з половин інтервалу призводить до зменшення помилки, обирається відповідна частина інтервалу. Таким чином, після кожної ітерації ширина діапазону пошуку зменшується у два рази:

$$[L_j, U_j] \rightarrow \frac{1}{2}(U_j - L_j). \quad (10)$$

Крок 4.5. Перевірка критерію зупинки. Ітерації продовжуються до виконання однієї з умов:

1. Інтервал став меншим за задану точність ε .
2. Зміна функції помилки стала незначною або не змінюється декілька ітерацій поспіль;
3. Досягнуто максимальну кількість ітерацій.

У результаті отримується набір параметрів, що забезпечує локально оптимальне розділення у поточному вузлу.

Крок 5. Вибір найкращого типу гіперфігури. Після завершення процедури оптимізації для кожної фігури $\theta_k \in \Theta$ отримується набір параметрів, що забезпечує мінімальне значення функції помилки у межах розглянутих інтервалів пошуку. На цьому етапі необхідно визначити модель, яка забезпечує найкращу якість розділення з урахуванням не лише точності, але й складності опису, яка призводить до зменшення швидкодії результуючої моделі.

Крок 5.1. Обчислення узагальненого критерію якості. Для кожної фігури формується інтегральна оцінка

$$Q_k = E_k + \lambda \cdot C_k, \quad (11)$$

де E_k – значення помилки класифікації для k -ї фігури; C_k – показник складності моделі; λ – коефіцієнт регуляції.

Крок 5.2. Оцінка складності. Складність може визначатись як кількість параметрів у рівнянні, порядок поліному (при $k=5$) та необхідна кількість операцій для перевірки предикату. Це дозволяє віддавати перевагу простішим моделям у випадках, коли вони демонструють близьку якість розподілення між собою.

Крок 5.3. Вибір оптимальної моделі. Тип гіперфігури визначається за правилом:

$$\theta^* = \underset{k}{arg \min} Q_k. \quad (12)$$

Крок 5.4. Перевірка доцільності поділу. Якщо отримане покращення відносно батьківського вузла є незначним або кількість зразків у підмножинах стає меншою за встановлений поріг, або досягнуто розподіл з нульовим значенням помилки, подальше розгалуження припиняється, а такий вузол оголошується листом.

Крок 6. Формування дочірніх вузлів та рекурсивне продовження побудови дерева. Після визначення оптимального типу гіперфігури θ^* та відповідного набору параметрів виконується безпосереднє розділення підвибірки поточного вузла на нові підмножини відповідно до значення предикату $P(X, k)$.

Крок 6.1. Розподіл зразків. Кожен об'єкт X_i із підмножини TS_v перевіряється на виконання умови належності до області, визначеної обраною гіперфігурою. У результаті формуються дві підмножини: ліва гілка для зразків з істинним значенням предикату та права гілка для яких умова не виконується.

Крок 6.2. Проведення аналізу отриманих підмножин. Обчислюється кількість елементів для кожної гілки, однорідність класів та можливість подальшого зменшення помилки.

Крок 6.3. Перевірка критеріїв зупинки. Рекурсивне розгалуження припиняється, якщо виконується хоча б одна з умов:

1. Досягнуто максимально допустиму глибину дерева;
2. Кількість зразків у вузлах менша за порогове значення;
3. Зменшення функції помилки є незначним.
4. Усі об'єкти належать одному класу.

У цьому випадку вузол оголошується листом, а його клас визначається за правилом більшості.

Крок 6.4. Рекурсивний виклик. Якщо умови зупинки не виконуються, для кожної підмножини процеду-

ра вибору типу гіперфігури та її параметрів повторюється, починаючи з Кроку 2. Виклики додаються в чергу з пріоритетом на обсяг помилки – чим більше значення помилки тим пріоритетніше вузол дерева.

Аналіз обчислювальної складності запропонованого методу та очікуваний вплив на показники якості класифікації

Запропонований метод побудови дерев із багатовимірними вузлами рішень передбачає виконання кількох вкладених процедур, основними з яких є вибір типу гіперфігури, оптимізація її параметрів та рекурсивне формування структури дерева. Обчислювальна складність алгоритму визначається кількістю об'єктів навчальної вибірки, розмірністю простору ознак, числом кандидатних моделей і необхідною точністю підбору параметрів.

Нехай N – кількість зразків у поточному вузлі, M – кількість ознак, K – число можливих типів гіперфігур, P_k – кількість параметрів для моделі типу k .

Складність оцінювання предиката. Перевірка належності одного зразка до області визначеної гіперфігурою, потребує $O(M)$ або $O(P_k)$ операцій залежно від виду рівняння. Відповідно оцінювання розділення для всіх об'єктів вузла має складність $O(N \cdot P_k)$.

Складність підбору параметрів. У процедурі оптимізації використовується ітераційне звуження інтервалів пошуку. Якщо для кожного параметра потрібно досягти точності ε , а початкова ширина інтервалу становить D , кількість ітерацій для одного параметра дорівнюватиме:

$$l = \log_2(D/\varepsilon). \quad (13)$$

Тоді повна складність пошуку параметрів однієї гіперфігури може бути оцінена як:

$$O(I \cdot N \cdot P_k). \quad (14)$$

Складність вибору типу фігури. Оскільки процедура виконується для кожного з K кандидатів, сумарні витрати становитимуть:

$$O(K \cdot I \cdot N \cdot P_k). \quad (15)$$

Рекурсивна складність побудови дерева. Глибина дерева у середньому є логарифмічною відносно кількості зразків. Тому повну складність навчання можна наближено оцінити як:

$$O(K \cdot I \cdot P_k \cdot N \cdot \log N). \quad (16)$$

Отримані співвідношення свідчать, що основні витрати пов'язані з оптимізацією параметрів багатовимірних вузлів. Водночас використання процедури дихотомічного звуження інтервалів забезпечує логарифмічну залежність від точності пошуку, що суттєво зменшує обчислювальні витрати порівняно з повним перебором. Крім того, зменшення кількості вузлів і глибини дерева завдяки більш точному моделюванню меж між класами частково компенсує зростання складності окремого розділення. Таким чином, запропонований підхід забезпечує прийнятний баланс між точністю класифікації та ресурсами, необхідними для навчання моделі.

В табл. 1 наведено порівняльний аналіз обчислювальної складності методів побудови дерев рішень. Запропоноване удосконалення процедури формування багатовимірних вузлів дозволяє сформулювати низку теоретичних положень щодо очікуваної поведінки моделі під час навчання та узагальнення.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз з класичними методами та першою версією

Характеристика	Класичні методи побудови дерев рішень (одновимірні вузли)	Метод побудови дерев з багатовимірними вузлами рішень	Модифікований метод побудови дерев з багатовимірними вузлами рішень
Тип розділення простору ознак	Порогове значення по одній ознаці	Гіперсферами або пороговим значенням по одній ознаці	Адаптивний вибір гіперфігури (площина, сфера, поліном тощо)
Кількість параметрів у вузлі	1 поріг	Центр та радіус ($\approx M$)	Залежить від типу фігури, може перевищувати M
Пошук параметрів	Лінійний або бінарний по відсортованих значеннях	Ітераційна оптимізація	Ітераційна оптимізація з вибором моделі
Вартість оцінювання одного кандидата	$O(N)$	$O(N \cdot M)$	$O(N \cdot P_k)$
Кількість кандидатів у вузлі	$\approx M$	1 тип фігури	K типів фігур
Складність оптимізації	Низька	Середня	Вища, але контрольована регуляризацією
Типова глибина дерева	Відносно велика	Менша	Найменша за рахунок гнучких меж
Ризик перенавчання	Високий при великих глибинах	Помірний	Контрольований через штраф складності
Інтерпретованість	Висока	Висока	Зберігається, але залежить від типу поверхні
Орієнтовна складність навчання	$O(M \cdot N \cdot \log N)$	$O(I \cdot M \cdot N \cdot \log N)$	$O(K \cdot I \cdot P_k \cdot N \cdot \log N)$
Компенсація зростання складності	Відсутня	Менша кількість вузлів	Менша кількість вузлів та краща якість розділення

Розширення класу можливих розділяючих поверхонь підвищує ймовірність побудови більш точного

локального поділу простору ознак у кожному вузлі. Унаслідок цього для досягнення заданого рівня по-

милки може знадобитися менша кількість рекурсивних розгалужень у порівнянні з одновимірними розділеннями.

Використання нелінійних гіперфігур забезпечує кращу відповідність геометрії розділення реальному розподілу даних. Це особливо важливо у випадках наявності корельованих ознак або складних форм кластерів, де ортогональні поділи призводять до фрагментації простору.

Хоча кількість параметрів у вузлі збільшується, зменшення числа самих вузлів і глибини дерева частково або повністю компенсує додаткові витрати. Таким чином, загальна складність моделі може зростати повільніше, ніж складність окремого розділення.

Більш адекватне моделювання локальної структури даних сприяє зменшенню потреби у глибоких ієрархіях та великій кількості послідовних розщеплень. Це знижує ризик накопичення локальних помилок і позитивно впливає на стабільність моделі на тестових вибірках.

Незважаючи на ускладнення математичного опису вузлів, рішення все ще можуть бути представлені у вигляді явних аналітичних умов належності до області. Це дозволяє зберігати властивості інтерпретації результату, притаманні деревним моделям.

Очікуваний вплив удосконаленого методу на показники якості класифікації. Запропоноване розширення класу розділяючих поверхонь у багатовимірних вузлах рішень створює передумови для покращення основних характеристик ефективності класифікації. Теоретичні міркування, наведені у попередньому підрозділі, дозволяють сформулювати низку очікувань щодо поведінки моделі під час експериментальної перевірки.

Першим критерієм розглянемо класичну точність Accuracy. Більш гнучке представлення меж між класами дозволяє зменшити кількість помилково класифікованих зразків у прикордонних областях. За рахунок цього очікується зростання загальної частки правильних передбачень, особливо у випадках складних або перекривних розподілів. Наступним виступають показники повноти та точності позитивних класів (Recall, Precision). Можливість точніше локалізувати області, характерні для аномальних станів, повинна сприяти зменшенню як хибно-негативних, так і хибно-позитивних рішень. Це має позитивно відобразитися на балансі між повнотою виявлення загроз та кількістю помилкових спрацьовувань. Також слід розглянути інтегральні метрики (F₁-score, MCC). Оскільки зазначені показники враховують співвідношення різних типів помилок, їх покращення очікується як наслідок більш узгодженого поділу простору ознак. Особливо це важливо для задач із дисбалансом класів, де локальні неточності можуть суттєво впливати на підсумковий результат.

Крім підвищення оцінок якості слід також розглянути очікування щодо стабільності моделі. Зменшення необхідної глибини дерева та скорочення кількості послідовних розділень мають сприяти зниженню варіативності результатів при зміні навчальних підвбірок. Це дозволяє очікувати кращої відтворюваності та більш передбачуваної поведінки моделі на нових

даних. Загалом, очікується, що модифікований метод забезпечить покращення як локальних, так і глобальних характеристик класифікації, зберігаючи інтерпретованість і керованість моделі. Остаточна перевірка сформульованих припущень здійснюється у межах експериментальних досліджень, результати яких наведено в наступних розділах.

Експериментальні дослідження

Експериментальна перевірка запропонованого удосконаленого методу побудови дерев із багатовимірними вузлами рішень спрямована на оцінювання його здатності підвищувати точність ідентифікації станів комп'ютерних систем у порівнянні з класичними та раніше розробленими підходами. Основною метою експериментів є підтвердження того, що розширення класу розділяючих поверхонь дозволяє більш адекватно описувати структуру даних без критичного збільшення обчислювальних витрат.

Для забезпечення коректності порівняння було використано набір даних, сформований у межах попередніх досліджень [15–19] і сумісний із роботами, присвяченими застосуванню дерев із багатовимірними вузлами. Вибір саме цієї вибірки дозволяє безпосередньо оцінити внесок запропонованого удосконалення, виключаючи вплив сторонніх факторів.

Дані відображають функціонування комп'ютерних систем у нормальних та аномальних режимах і включають показники завантаження процесора, використання оперативної пам'яті, активності дискових підсистем, мережових характеристик та поведінкових параметрів процесів. Такий набір ознак забезпечує багатовимірне представлення стану системи та створює умови для формування складних меж між класами. Початковий масив даних було розділено на початкову та тестову частини. Навчальна вибірка використовується для побудови моделей і оптимізації параметрів вузлів, тоді як тестова – для оцінювання узагальнюючої здатності. Розподіл здійснювався з урахуванням збереження пропорцій між нормальними та аномальними станами. Для визначення ефективності модифікованого підходу проводилось порівняння з такими алгоритмами:

1. Класичне дерево рішень з одновимірними пороговими вузлами (DT);
2. Дерево з багатовимірними вузлами на основі гіперсфер (MDT);
3. Удосконалений метод з адаптивним вибором типу гіперфігури (AMDT, який пропонується в статті).

Таке порівняння дозволить оцінити як абсолютний виграш у якості, а також приріст відносно попередніх етапів розвитку методу.

Для аналізу результатів використовувались показники, що є стандартними для задач класифікації: Accuracy, Recall, Precision, F₁-Score та коефіцієнт кореляції Метьюза (MCC).

Використання набору взаємодоповнюючих метрик дозволяє уникнути викривленої інтерпретації результатів та забезпечить комплексну оцінку поведінки моделі. Оптимізація параметрів гіперфігур у вузлах здійснювалася за процедурою ітераційного звуження області пошуку. Для забезпечення справе-

дливості порівняння всі методи реалізовано в однаковому програмному середовищі та запускались на однакових апаратних ресурсах.

Результати методів з основними метриками якості продемонстровано у табл. 2 та табл. 3.

Таблиця 2 – Порівняння якості ідентифікації стану КС

Метод ідентифікації стану КС	Acc	F1-Score	MCC
DT	0,679	0,647	0,364
MDT	0,909	0,916	0,831
AMDT	0,979	0,980	0,959

Таблиця 3 – Порівняння точності та повноти

Метод ідентифікації стану КС	Precision	Recall
DT	0,718	0,589
MDT	0,847	0,998
AMDT	0,963	0,997

Починаючи з узагальнених показників видно стабільне покращення результатів при переході від одновимірних до багатовимірних та далі до адаптивних вузлів. Підвищення повноти свідчить про зменшення пропущених аномалій, тоді як зростання точності вказує на скорочення кількості хибних спрацьовувань. Отримані результати підтверджують, що адаптивний вибір форми розділяючої поверхні дозволяє ефективніше описувати складні області у просторі ознак, ніж використання фіксованої геометрії. Візуалізації отриманих метрик зазначено на рис. 1 для F1-Score, рис. 2 для MCC а також рис. 3-4 для частки хибних спрацьовувань та пропущених аномалій.

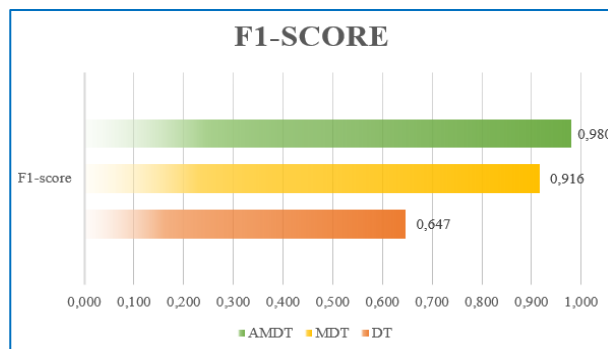


Рис. 1. Порівняння за метрикою F1-Score

Отримані дані демонструють, що використання складніших гіперфігур дозволяє точніше описувати прикордонні області між класами. У класичних деревах для досягнення подібної точності необхідно значно збільшувати глибину, що призводить до накопичення помилок у нижніх ярусах. Базовий варіант із гіперсферичними вузлами вже забезпечує суттєве покращення, однак обмеження форми не дозволяє повністю адаптуватися до реальної геометрії даних.

Удосконалений метод демонструє найкращі результати завдяки можливості локально підбирати тип

поверхні, що мінімізує як помилки класифікації, так і необхідну кількість розгалужень.

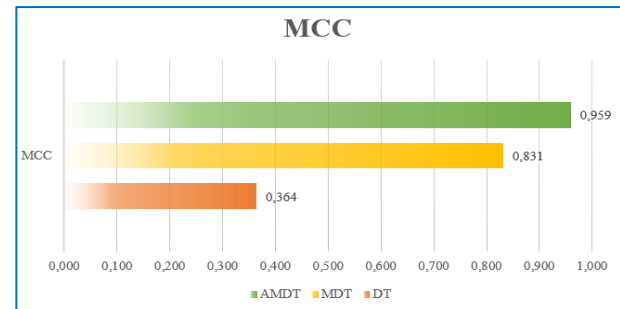


Рис. 2. Порівняння за метрикою кореляційного коефіцієнта Метьюза

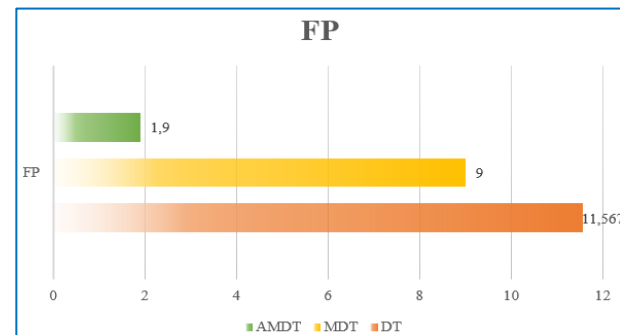


Рис. 3. Порівняння за часткою хибних спрацьовувань або помилок першого роду (у відсотках)

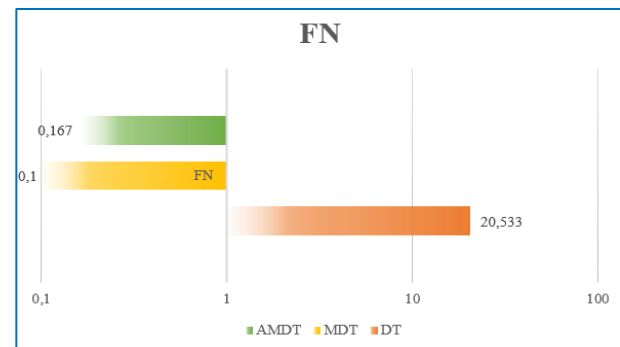


Рис. 4. Порівняння за часткою пропусків загроз або помилок другого роду (у відсотках, логарифмічна шкала)

Оцінка результатів та формування рекомендацій для подальших досліджень

Проведені експериментальні дослідження підтвердили доцільність розширення класу розділяючих поверхонь у багатовимірних вузлах рішень. У порівнянні з класичними підходами та попередньою реалізацією дерев із фіксованою геометрією вузлів запропонований метод продемонстрував стабільне покращення інтегральних показників якості класифікації, зокрема F1-Score та коефіцієнта кореляції Метьюза.

Найбільший вигреш спостерігається у прикордонних областях між класами, де використання гнучкіших поверхонь дозволило зменшити як кількість пропущених аномалій, так і частоту хибних спрацьовувань. Це свідчить про здатність методу точніше враховувати внутрішню геометрію простору ознак і формувати більш узгоджені правила прийняття рішень. Важливим результатом є також зменшення

варіативності моделей при повторних запусках навчання. Скорочення глибини дерев та кількості послідовних поділів дозволило знизити накопичення локальних похибок, що позитивно вплинуло на відтворюваність результатів і стабільність роботи алгоритму на нових даних.

Разом із тим встановлено, що підвищення точності супроводжується зростанням витрат часу на оптимізацію параметрів вузлів. Проте за рахунок використання процедур спрямованого звуження області пошуку та зменшення кількості необхідних розгалужень загальні витрати залишаються прийнятними для практичного застосування в системах моніторингу стану комп'ютерних систем.

Отримані результати дозволяють рекомендувати запропонований метод для використання у задачах, де важливими є інтерпретованість моделей, висока точність виявлення аномалій та стійкість до зміни розподілу даних.

Подальший розвиток підходу може бути спрямований на автоматизацію вибору набору кандидатних гіперфігур, розробку більш ефективних методів оптимізації параметрів у високорозмірних просторах, а також інтеграцію механізмів адаптивного оновлення структури дерева під час надходження нових даних. Перспективним є також дослідження можливостей комбінування запропонованого методу з ансамблевими та гібридними архітектурами, що можуть додатково підвищити стійкість до шумів і невизначеності.

Висновки

У роботі запропоновано удосконалений метод побудови дерев рішень із багатовимірними вузлами для задачі ідентифікації стану комп'ютерних систем. Основною особливістю підходу є розширення класу розділяючих поверхонь та впровадження процедури адаптивного вибору типу гіперфігури у кожному вузлі на основі мінімізації функції помилки з урахуванням складності моделі.

Розроблено алгоритм ітераційного підбору параметрів, що базується на спрямованому звуженні області пошуку та забезпечує контрольоване зростання обчислювальних витрат.

Запропонована стратегія дозволяє ефективно працювати у багатовимірному просторі ознак без необхідності повного перебору можливих конфігурацій.

Теоретичний аналіз показав, що використання гнучкіших геометричних моделей дозволяє зменшити необхідну глибину дерева, покращити апроксимацію меж між класами та знизити ризик накопичення локальних помилок.

При цьому зберігається інтерпретованість рішень, що є важливою вимогою для систем моніторингу та інформаційної безпеки.

Результати експериментальних досліджень підтвердили сформульовані очікування. Удосконалений метод продемонстрував підвищення показників Accuracy (0.97), Precision (0.96), Recall (0.99), F1-score (0.98) та MCC (0.96) у порівнянні з класичними деревами та базовою реалізацією багатовимірних вузлів.

Отже, запропонований підхід є перспективним для практичного використання у задачах автоматизованої ідентифікації станів комп'ютерних систем, особливо в умовах складної структури даних, наявності шумів та перекивання класів.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. K. Thirasak, T. Chuaphanngam, D. Chainarong and S. Fugkeaw, "TF2ML: Threat Filtering With Two-Stage Machine Learning for Efficient Provenance-Aware Threat Detection and Response," in *IEEE Open Journal of the Computer Society*, vol. 6, pp. 1751-1762, 2025, doi: <https://doi.org/10.1109/OJCS.2025.3618157>
2. A. T. Haile, S. L. Abebe and H. M. Melaku, "Real-Time Automated Cyber Threat Classification and Emerging Threat Detection Framework," in *IEEE Open Journal of the Computer Society*, vol. 6, pp. 921-930, 2025, doi: <https://doi.org/10.1109/OJCS.2025.3580235>
3. O. Cherqi, Y. Moukafih, M. Ghogho and H. Benbrahim, "Enhancing Cyber Threat Identification in Open-Source Intelligence Feeds Through an Improved Semi-Supervised Generative Adversarial Learning Approach With Contrastive Learning," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 84440-84452, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3299604>
4. M. Zaman, D. Upadhyay and C. -H. Lung, "Validation of a Machine Learning-Based IDS Design Framework Using ORNL Datasets for Power System With SCADA," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 118414-118426, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3326751>
5. A. Al Siam, M. Alazab, A. Awajan and N. Faruqi, "A Comprehensive Review of AI's Current Impact and Future Prospects in Cybersecurity," in *IEEE Access*, vol. 13, pp. 14029-14050, 2025, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3528114>
6. P. Kumar, R. Kumar, A. Jolfaei and N. Mohammad, "An Automated Threat Intelligence Framework for Vehicle-Road Cooperation Systems," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 22, pp. 35964-35974, 15 Nov.15, 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/IJOT.2024.3397652>
7. T. A. Al-Shehari *et al.*, "Enhancing Insider Threat Detection in Imbalanced Cybersecurity Settings Using the Density-Based Local Outlier Factor Algorithm," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 34820-34834, 2024, doi: [10.1109/ACCESS.2024.3373694](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3373694)
8. A. M. Almasabi, M. Khemakhem, F. E. Eassa, A. Ahmed Abi Sen, A. B. Alkhodre and A. Harbaoui, "A Smart Framework to Detect Threats and Protect Data of IoT Based on Machine Learning," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 176833-176844, 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3498603>

9. A. Algarni, T. Acarer and Z. Ahmad, "An Edge Computing-Based Preventive Framework With Machine Learning- Integration for Anomaly Detection and Risk Management in Maritime Wireless Communications," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 53646-53663, 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3387529>
10. R. Marinho and R. Holanda, "Automated Emerging Cyber Threat Identification and Profiling Based on Natural Language Processing," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 58915-58936, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3260020>
11. S. Lee, A. Abdulboriy Abdulkhay Ugli and J. S. Shin, "More Realistic Audio-Based Drone Detection and Identification Approaches With Machine Learning," in *IEEE Access*, vol. 13, pp. 170328-170350, 2025, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3613683>
12. K. Xia *et al.*, "Privacy-Preserving Brain-Computer Interfaces: A Systematic Review," in *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, vol. 10, no. 5, pp. 2312-2324, Oct. 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/TCSS.2022.3184818>
13. M. Mehmood, R. Amin, M. M. A. Muslam, J. Xie and H. Aldabbas, "Privilege Escalation Attack Detection and Mitigation in Cloud Using Machine Learning," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 46561-46576, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3273895>
14. R. Allafi and I. R. Alzahrani, "Enhancing Cybersecurity in the Internet of Things Environment Using Artificial Orca Algorithm and Ensemble Learning Model," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 63282-63291, 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3390093>
15. S. Y. Gavrylenko, V. V. Chelak, S. G. Semenov Development of Method for Identification the Computer System State based on the Decision Tree with Multi-Dimensional Nodes / Radio Electronics, Computer Science, Control (RECS), Zaporizhzhia, No. 2 (2022), P. 113-122, doi: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-2-11>
16. Chelak V., Hornostal O., Chelak Y., Gavrylenko S. "Decision Tree Construction Method using Cuckoo Search for Computer System State Identification", 2025 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2025 doi: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61436.2025.11288613>
17. О. Горносталь, В. Челак. Класифікація мережевих атак методами машинного навчання в умовах дисбалансу тренувальних даних / Системи управління, навігації та зв'язку, Полтава, 2025, Том 3 (81), С. 64-71, doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.3.064>
18. V. Chelak, O. Hornostal, Ye. Chelak, S. Gavrylenko. Advanced Methods for Classification Quality Assessment Leveraging ROC Analysis and Multidimensional Confusion Matrix. *Advanced Information Systems*, 2025, Vol 9(1), pp. 24–34, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.1.03>
19. В. Челак, О. Горносталь, Нечіткий ансамбль дерев рішень для ідентифікації стану комп'ютерних систем/ Системи управління, навігації та зв'язку, Полтава, 2025, Том 4 (82), С. 144-150, doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.4.144>

Received (Надійшла) 03.01.2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

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; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8810-3394>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216331944&origin=resultslist>.

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; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5820-9999>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57189040595>.

Improved method for constructing trees with multidimensional decision nodes for computer system state identification

Viktor Chelak, Oleksii Hornostal

Abstract. The object of the research is the process of computer system state identification based on the analysis of multidimensional operational data. The subject of the research is methods for constructing decision trees with multidimensional decision nodes and algorithms for optimizing their structure in computer system state classification tasks. The goal of the research is to develop and investigate an improved method for constructing decision trees with multidimensional decision nodes that provides higher accuracy and better generalization ability of computer system state identification models under complex and uncertain conditions. **Methods:** machine learning techniques, tree-based classification models, nonlinear space partitioning procedures, iterative parameter optimization based on search interval reduction, and classification quality assessment approaches. **Results:** a procedure for automated selection of the hyperfigure type within a tree node has been developed, enabling the adaptation of the decision boundary to the local structure of data. It has been shown that the use of generalized surfaces reduces the required tree depth and decreases the number of consecutive splits. Experimental studies demonstrate improvements in Accuracy, Precision, Recall, F1-score, and MCC compared with classical decision trees and models with fixed node geometry. **Conclusions:** the proposed method provides more accurate and stable modeling of boundaries between computer system states while preserving interpretability and maintaining acceptable computational costs. The obtained results confirm the feasibility of applying adaptive multidimensional nodes in monitoring and information security systems.

Keywords: state identification, computer systems, decision tree, multidimensional node, nonlinear partitioning, decisive rule, machine learning.

Є. В. Челак, Г. В. Гейко

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

КЛАСИФІКАЦІЯ ВРАЗЛИВОСТЕЙ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ФОРМУВАННЯ ОЗНАК ЇХ НАЯВНОСТІ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Анотація. Об’єктом дослідження є процес виявлення вразливостей у програмному забезпеченні. Предметом дослідження є підходи до класифікації вразливостей та методи формування ознак їх наявності, придатних для використання в алгоритмах машинного навчання. Метою роботи є систематизація існуючих типів дефектів безпеки та розробка методу витягу і попередньої обробки характеристик, що забезпечують можливість їх формалізованого представлення у вигляді числового простору ознак. У роботі проаналізовано основні принципи класифікації вразливостей за причинами виникнення, способом експлуатації, рівнем прояву та впливом на властивості безпеки. Запропоновано узагальнену систему структурних, поведінкових і контекстних параметрів, які можуть виступати індикаторами потенційних дефектів. Розроблено процедури перетворення різнорідних даних, що включають нормалізацію числових величин, кодування категоріальних характеристик, бінаризацію логічних ознак та зменшення розмірності. Отримані результати створюють методичну основу для подальшої розробки інтелектуальних систем автоматизованого виявлення вразливостей програмного забезпечення.

Ключові слова: вразливості програмного забезпечення, класифікація, інформативні ознаки, попередня обробка даних, машинне навчання, інформаційна безпека.

Вступ

Сучасне програмне забезпечення є складними багаторівневими системами, що функціонують у динамічному середовищі та взаємодіють із великою кількістю зовнішніх сервісів, мережових компонентів і користувачів. Зростання обсягів коду, використання сторонніх бібліотек і постійне оновлення функціональності призводять до підвищення ймовірності появи дефектів безпеки, які можуть бути використані зловмисниками для порушення конфіденційності, цілісності та доступності інформації. У зв’язку з цим проблема своєчасного виявлення вразливостей програмного забезпечення є однією з ключових у сфері комп’ютерної інженерії.

Традиційні підходи до аналізу безпеки, що базуються на експертних перевірках, сигнатурному пошуку або ручному аудиту коду, потребують значних ресурсів та не завжди здатні забезпечити необхідний рівень масштабності. Крім того, багато сучасних вразливостей мають складну природу та проявляються лише за певних умов виконання програм, що ускладнює їх формалізацію у вигляді жорстких правил. Це стимулює розвиток підходів, орієнтованих на автоматизований аналіз даних та використання методів машинного навчання.

Ефективність застосування алгоритмів машинного навчання безпосередньо залежить від якості опису об’єктів дослідження у просторі ознак. Тому поряд із розробкою моделей класифікації важливою задачею є систематизація типів вразливостей і визначення характеристик, що можуть свідчити про їх наявність у програмному забезпеченні. Формування таких ознак дозволяє перейти від якісного експертного аналізу до кількісних методів оцінювання та створює основу для побудови інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

Таким чином, актуальним є дослідження, спрямоване на побудову узагальненої класифікації враз-

ливостей програмного забезпечення та визначення набору інформативних параметрів, придатних для подальшого використання у моделях машинного навчання.

Об’єктом дослідження є процес виявлення вразливостей у програмному забезпеченні.

Предметом дослідження є методи класифікації вразливостей та підходи до формування ознак їх наявності, що можуть бути використані алгоритмами машинного навчання.

Метою роботи є систематизація вразливостей програмного забезпечення та розробка підходу до формування інформативного простору ознак для забезпечення можливості їх автоматизованого виявлення із застосуванням методів машинного навчання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Визначити типові групи дефектів безпеки та їх характерні прояви;
2. Сформулювати перелік потенційно інформативних ознак для кожного класу;
3. Обґрунтувати можливість використання сформованих ознак у задачах машинного навчання

Класифікація вразливостей

Проблема систематизації вразливостей програмного забезпечення залишається актуальною протягом тривалого часу, оскільки від коректності класифікації залежить ефективність методів їх виявлення, аналізу ризиків та вибору механізмів захисту [1]. Існуючі підходи до поділу вразливостей базуються на різних принципах: джерелі виникнення, способі експлуатації, рівні прояву, типі порушуваних властивостей безпеки або особливостях життєвого циклу програмного забезпечення [2].

У більшості досліджень відзначається, що універсальної класифікаційної схеми не існує, оскільки одна й та сама вразливість може одночасно належати до декількох категорій [3]. Тому на практиці часто

використовуються багаторівневі або ієрархічні структури, які дозволяють поєднати різні аспекти аналізу.

Класифікація за причинами виникнення. Одним із найбільш поширених підходів є поділ вразливостей відповідно до природи помилки, що призвела до їх появи [1, 2]. У межах цього підходу зазвичай виділяють: помилки проектування архітектури; дефекти реалізації алгоритмів; некоректну обробку виняткових ситуацій; недоліки механізмів автентифікації та авторизації; помилки конфігурації та розгортання. Такий поділ дозволяє встановити взаємозв'язок між етапами життєвого циклу розробки та потенційними загрозами безпеці.

Класифікація за способом експлуатації. Інший підхід орієнтований на механізм використання вразливості зловмисником [3, 4]. У цьому випадку розглядаються: ін'єкційні атаки; переповнення буфера; міжсайтове виконання сценаріїв (XSS); підвищення привілеїв; віддалене виконання коду.

Подібна систематизація є зручною для побудови моделей загроз і оцінювання можливих наслідків атак.

Класифікація за рівнем прояву. Вразливості можуть також групуватися відповідно до рівня програмної або апаратної інфраструктури, на якому вони виникають [4]. Зазвичай виділяють: рівень вихідного коду; рівень програмних компонентів та бібліотек; рівень операційної системи; мережевий рівень; рівень конфігурацій та політик безпеки.

Такий підхід дозволяє точніше визначити відповідальність між розробниками, адміністраторами та операторами систем.

Класифікація за впливом на властивості безпеки. З точки зору результату експлуатації, вразливості традиційно співвідносяться з порушенням конфіденційності, цілісності або доступності інформації [5].

У межах цього підходу вони можуть призводити до: витоку даних; модифікації або знищення інформації; блокування роботи сервісів; отримання несанкціонованого контролю над системою.

Подібна класифікація широко використовується під час аналізу ризиків та визначення пріоритетів усунення дефектів.

Незважаючи на різноманіття існуючих схем, більшість із них орієнтовані на експертний аналіз і не завжди придатні для безпосереднього використання у задачах машинного навчання. Причиною цього є відсутність формалізованих параметрів, які можна було б кількісно виміряти або автоматично отримати з процесу функціонування програмного забезпечення [1–5]. Тому актуальною задачею є перехід від описових категорій до таких характеристик, які можуть бути представлені у вигляді набору інформативних ознак. Саме це дозволяє трансформувати класифікацію вразливостей у прикладну основу для побудови інтелектуальних систем їх автоматизованого виявлення.

Формування ознак наявності вразливостей програмного забезпечення

На рис. 1 представлено ієрархію ознак, які можуть бути згруповані на структурні, поведінкові та контекстні ознаки.

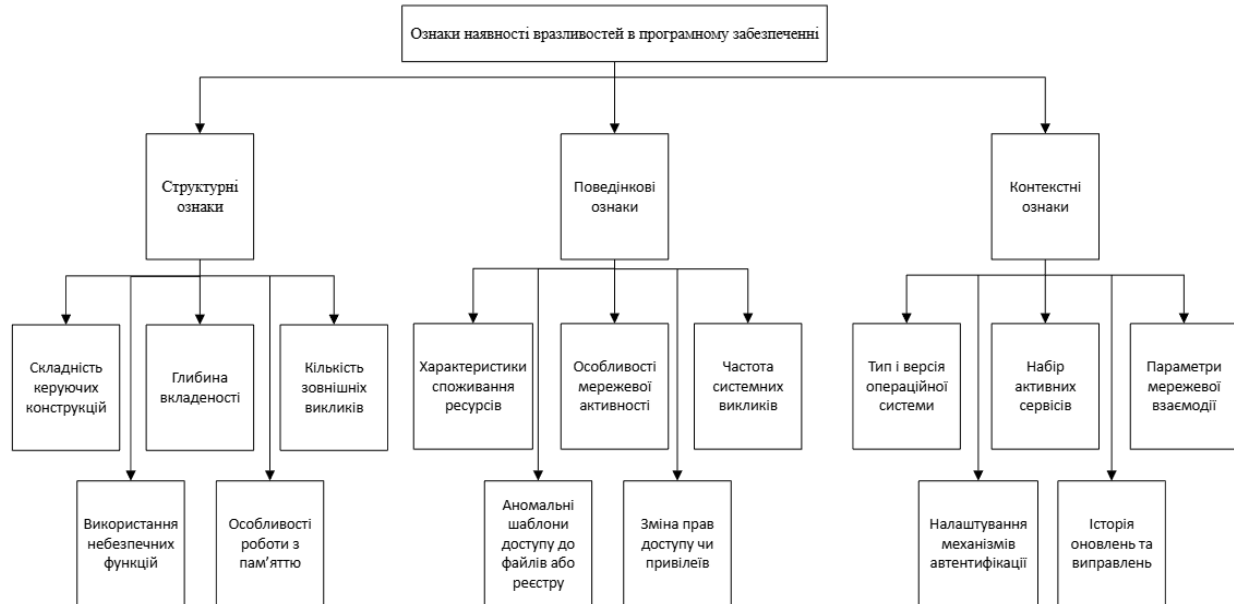


Рис 1. Групи ознак наявності вразливостей в програмному забезпеченні

Перехід до використання методів машинного навчання у задачах виявлення вразливостей потребує формалізації характеристик програмного забезпечення у вигляді числових або категоріальних параметрів. На відміну від експертних підходів, де аналіз часто виконується якісно, алгоритми класифікації потребують чітко визначеного простору ознак, що відображає потенційні прояви дефектів безпеки.

Формування таких ознак є складною задачею, оскільки більшість вразливостей мають прихований характер і можуть проявлятися лише під час виконання певних сценаріїв роботи програм. У зв'язку з цим доцільним є використання багаторівневого підходу, який враховує структурні, поведінкові та контекстні характеристики програмного забезпечення. Структурні ознаки описують внутрішні властивості

програмного коду та архітектури системи. Вони можуть бути отримані за допомогою статичного аналізу без виконання програми. Подібні параметри дозволяють виявляти потенційно проблемні ділянки, що статистично частіше пов'язані з наявністю дефектів безпеки.

На відміну від структурних, поведінкові ознаки формуються під час виконання програмного забезпечення та відображають його взаємодію з операційною системою, мережею та іншими компонентами інфраструктури. Поведінкові параметри особливо інформативні для виявлення вразливостей, що не можуть бути встановлені лише шляхом аналізу вихідного коду.

Значна частина ризиків безпеки залежить від умов експлуатації програмного забезпечення. Тому додатково враховуються контекстні характеристики, пов'язані з конфігурацією середовища, версіями компонентів та політиками доступу. У багатьох випадках саме комбінація структурних і контекстних факторів створює передумови для реалізації атаки.

Для ефективного використання у моделях машинного навчання сформований набір параметрів повинен відповідати ряду вимог:

- мати вимірюваний або формалізований характер;
- забезпечувати відтворюваність результатів;
- бути чутливим до змін стану безпеки;
- мінімізувати надлишковість та кореляцію між показниками.

Екстракція та попередня обробка ознак для задач машинного навчання

Ефективність застосування алгоритмів машинного навчання у задачах виявлення вразливостей програмного забезпечення безпосередньо залежить від способу представлення первинної інформації. Дані, що отримуються зі статичного або динамічного аналізу, як правило, мають неоднорідний характер, можуть містити текстові, числові, булеві або категоріальні значення та відрізнятися за масштабом вимірювання.

У зв'язку з цим необхідною є процедура їх перетворення у формалізований вектор ознак, придатний для подальшої автоматизованої обробки.

Нехай програмний об'єкт описується множиною сирих параметрів:

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}, \quad (1)$$

де кожен елемент може належати до різного типу даних.

Завданням попередньої обробки є відображення множини R у простір машинного навчання:

$$\Phi : R \rightarrow X, \quad (2)$$

де $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – вектор числових характеристик фіксованої довжини.

Першим кроком буде перетворення числових параметрів. Для кількісних показників (час виконання, обсяг пам'яті, інтенсивність мережевих запитів) застосовується нормалізація, що забезпечуватиме порівнюваність масштабів різних величин. Одним з поширених підходів є мін-макс перетворення:

$$x_i = \frac{r_i - r_i^{min}}{r_i^{max} - r_i^{min}}. \quad (3)$$

У випадках наявності викидів доцільним може бути використання стандартизації:

$$x_i = \frac{r_i - \mu_i}{\sigma_i}, \quad (4)$$

де μ_i та σ_i – середнє значення та стандартне відхилення відповідної ознаки.

Другим кроком є перетворення категоріальних параметрів, що можуть описувати типи операцій, режими доступу або види використовуваних протоколів. Такі параметри не можуть бути безпосередньо використані більшістю алгоритмів машинного навчання. Тому вони перетворюються у числове подання за допомогою кодування. Нехай параметр r_j може приймати k різних значень. Тоді формується вектор:

$$x_j = \{b_1, b_2, \dots, b_k\}, \quad (5)$$

де $b_t = \begin{cases} 1, & \text{якщо реалізовано } t \text{ категорію;} \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases}$

Такий підхід дозволяє уникнути хибного введення порядкових залежностей між категоріями.

Третім типом будуть перетворення текстових та логічних характеристик. Для таких параметрів, які відображають наявність або відсутність певних властивостей, використовується бінарне відображення. У випадку текстових описів або журналів подій можливе використання частотного представлення, при якому кожен елемент словника відображає кількість його появ у межах аналізованого об'єкта.

Останнім етапом буде формування підсумкового вектору та зменшення розмірності з усуненням надлишковості. Після всіх перетворень буде сформовано єдиний простір ознак X . Саме такий формат є стандартним для більшості сучасних алгоритмів класифікації, від нейронних мереж до дерев рішень та систем з підкріпленням.

Оскільки велика кількість параметрів може призводити до перенавчання моделей та збільшення обчислювальної складності, доцільним є виконання процедури відбору найбільш інформативних ознак. Узагальнено це можна представити як перетворення:

$$X \rightarrow X', \text{ де } \dim(X') < \dim(X). \quad (6)$$

У результаті підвищується стабільність навчання та узагальнююча здатність алгоритмів.

Таким чином, запропонований підхід до витягу та попередньої обробки забезпечує уніфіковане представлення різномірних характеристик програмного забезпечення у вигляді числового вектора, що створює основу для подальшого застосування методів машинного навчання у задачах автоматизованого виявлення вразливостей.

Висновки

У роботі розглянуто проблему систематизації вразливостей програмного забезпечення в контексті підготовки даних для застосування методів машинного навчання. Проведений аналіз існуючих підходів до класифікації дозволив виділити основні групи дефектів безпеки за причинами виникнення, спосо-

бом експлуатації, рівнем прояву та впливом на базові властивості інформаційних систем.

Показано, що більшість традиційних класифікацій орієнтовані переважно на експертне використання та мають описовий характер, що ускладнює їх безпосередню інтеграцію у автоматизовані процедури аналізу. У зв'язку з цим запропоновано підхід до переходу від якісного представлення вразливостей до формування формалізованого простору ознак, придатного для алгоритмічної обробки. Розроблено метод витягу та попередньої обробки ознак, що забезпечує перетворення різномірних даних у єдине числове представлення фіксованої розмірності. Запропоновані процедури нормалізації, кодування та зменшення розмірності дозволяють підвищити стабільність подальшого навчання моделей і зменшити вплив надлишкової або некорельованої інформації.

Отримані результати формують методичну основу для побудови автоматизованих систем виявлен-

ня вразливостей програмного забезпечення та можуть бути використані під час розробки класифікаційних, прогнозних і аналітичних моделей безпеки.

Перспективним напрямом подальших досліджень є експериментальна перевірка інформативності сформованих ознак на реальних наборах даних, а також розробка ансамблевих підходів, здатних адаптуватися до появи нових типів вразливостей і змін у програмному середовищі.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. E. Iannone, R. Guadagni, F. Ferrucci, A. De Lucia and F. Palomba, "The Secret Life of Software Vulnerabilities: A Large-Scale Empirical Study," *IEEE Trans. on Software Eng.*, vol. 49, no. 1, pp. 44-63, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/TSE.2022.3140868>
2. Q. Mao, Z. Li, X. Hu, K. Liu, X. Xia and J. Sun, "Towards Explainable Vulnerability Detection With Large Language Models," in *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 51, no. 10, pp. 2957-2971, Oct. 2025, doi: <https://doi.org/10.1109/TSE.2025.3605442>
3. G. Lin, S. Wen, Q. -L. Han, J. Zhang and Y. Xiang, "Software Vulnerability Detection Using Deep Neural Networks: A Survey," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 108 (10), pp. 1825-1848, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.2993293>
4. X. Yin, C. Ni and S. Wang, "Multitask-Based Evaluation of Open-Source LLM on Software Vulnerability," in *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 50, no. 11, pp. 3071-3087, 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/TSE.2024.3470333>
5. X. Zhang et al., "Effectively Detecting Software Vulnerabilities via Leveraging Features on Program Slices," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 12, no. 7, pp. 8033-8048, 1 April, 2025, doi: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3541090>
6. V. Chelak, O. Hornostal, Ye. Chelak, S. Gavrylenko. Advanced Methods for Classification Quality Assessment Leveraging ROC Analysis and Multidimensional Confusion Matrix. *Advanced Information Systems*, 2025, Vol 9(1), pp. 24–34, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.1.03>

Received (Надійшла) 17.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Челак Єгор Володимирович – аспірант кафедри "Комп'ютерна інженерія та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Yehor Chelak – PhD Student of Department of "Computer Engineering and Programming", National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: egor.chelak@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3898-4370>.

Гейко Геннадій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Комп'ютерна інженерія та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Hennadii Heiko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of "Computer Engineering and Programming", National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: hennadii.heiko@khi.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6958-8306>.

Classification of software vulnerabilities and formation of presence signs based on machine learning methods

Yehor Chelak, Hennadii Heiko

Abstract. The object of the study is the process of vulnerability detection in software. The subject of the study includes approaches to vulnerability classification and methods for forming indicators of their presence suitable for machine learning algorithms. The aim of the work is to systematize existing types of security defects and to develop a method for feature extraction and preprocessing that enables their formal representation within a numerical feature space. The paper analyzes the main principles of vulnerability classification according to root causes, exploitation techniques, manifestation levels, and impact on security properties. A generalized system of structural, behavioral, and contextual parameters that may serve as indicators of potential defects is proposed. Procedures for transforming heterogeneous data are developed, including normalization of numerical values, encoding of categorical attributes, binarization of logical features, and dimensionality reduction. The obtained results provide a methodological basis for the further development of intelligent systems for automated software vulnerability detection.

Keywords: software vulnerabilities, classification, informative features, data preprocessing, machine learning, information security.

Н. О. Чікіна, І. В. Антонова

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЧАСОВИХ РЯДІВ

Анотація. Актуальність. Статистичні дані по більшості соціальних, демографічних, медичних, екологічних показниках збираються частіше за все раз на рік. Такі ряди доступні лише за невеликими за обсягом даними в декілька років, тобто є короткими часовими рядами. Більшість існуючих методів кластеризації не є придатними для аналізу коротких часових рядів. Тому актуальною є задача подання інформації про числові ряди таким чином, щоб вона була достатньою для цілей задач кластеризації саме для коротких часових рядів. Останнім часом в науковій літературі з'явилися публікації з рекомендаціями надавати паралельно додаткову інформацію, що міститься у статистичних показниках вимірювань часових рядів, а також показники, які описують динаміку часових рядів, їх мінливість, але не залежать від часу. Залишається актуальною задача вибору міри близькості рядів. Існуючі дослідження щодо порівняльного аналізу міри близькості схиляються до того, що Евклідова відстань займає перше місце за якістю в задачах кластеризації часових рядів. **Об'єкт дослідження:** короткі часові ряди даних розповсюдженості окремих видів шкірних захворювань в регіонах України. **Мета статті:** порівняльний аналіз результатів кластеризації коротких часових рядів, отриманих із застосуванням різних мір близькості. **Результати дослідження.** У роботі досліджено часові ряди, що відображають дані з кількості випадків захворювань різними шкірними хворобами в регіонах України за певний період часу. Результати кластеризації таких часових рядів дають можливість зробити порівняльний аналіз даних і виявити групи регіонів України з «однаковою» ситуацією з цього питання. **Висновки.** Отримані результати можуть бути використані в подальших дослідженнях для виявлення причин відповідних рівнів захворюваності, таких, наприклад, як якість води, повітря, забруднення навколишнього середовища. Для вирішення цієї задачі автори, крім міри Евклідової відстані, застосовують міру близькості часових рядів за їх основними статистичними характеристиками та міру близькості показників динаміки досліджуваних рядів, а саме, рядів їх перших різниць. З методів кластеризації часових рядів обрана ієрархічна процедура. Проведено порівняльний аналіз отриманих результатів.

Ключові слова: математичне моделювання; короткий часовий ряд; порівняльний аналіз; ієрархічна процедура кластерного аналізу; міри близькості; дендрограма; функціонал якості.

Вступ

Постановка проблеми. Останнім часом спостерігається сплеск появи даних, що представлені у вигляді часових рядів. Це спровокувало зріст наукових досліджень з ціллю виявлення з цих даних різноманітної інформації. Основною задачею аналізу часових рядів залишається задача прогнозування його подальших значень. Одночасно з'являються наукові публікації щодо їх порівняльного аналізу за допомогою різних мір близькості.

Кластерний аналіз відноситься до класу методів порівняльного аналізу даних, який об'єднує методи класифікації, що засновані на визначенні поняття близькості (відстані) між об'єктами з подальшим виділенням з них груп (кластерів).

Мета кластеризації полягає в тому, щоб отримати такі групи (кластери), в яких відмінності між ознаками об'єктів всередині цих груп були б мінімальні, а відмінності між об'єктами – максимальні.

Кластерний аналіз не вимагає апріорних відомостей про розподіл даних. Часові ряди, на відміну від статичних даних, складаються з величин, що характеризують об'єкти дослідження, стан яких змінюється з часом. Тому використання кластерного аналізу для їх дослідження є можливим.

Існує достатньо велика кількість алгоритмів кластеризації. Однак, згідно з визначенням, наведеним в [1], всі методи кластеризації можна умовно поділити тільки на два класи: ієрархічні та засновані на поділі даних. В цілому, методи, засновані на поділі даних, в даний час є найбільш популярними, багато в чому завдяки їх математичній строгості, ясності

одержуваних результатів і просунутому програмному забезпеченню.

Робота кластерного аналізу спирається на два припущення. По-перше, це те, що об'єкти дослідження в принципі допускають розбиття сукупності на кластери. По-друге, правильність вибору масштабу або одиниці вимірювання ознак. Вибір масштабу в кластерному аналізі має велике значення. Якщо вимірювання часового ряду на порядок більші відповідних вимірювань ряду, то при розрахунках величини близькості між рядами, що відображають положення об'єктів у просторі їх властивостей, це стає неможливим коректно виконати. Зазначена проблема вирішується за допомогою попередньої стандартизації змінних. Стандартизація (standardization) або нормування (normalization) приводить значення всіх перетворених змінних до єдиного діапазону значень шляхом вираження через відношення цих значень до якоїсь величини, що відображає певні властивості конкретної ознаки.

Якість кластеризації часових рядів, як і будь-яких інших об'єктів дослідження за цим методом, залежить, по-перше, від обраного алгоритму кластеризації і, по-друге, від обраної міри близькості між рядами, що є характеристикою ступеня різниці між ними. В подібних задачах обрання міри близькості впливає на якість в більшій мірі порівняно з обранням методу кластеризації [2]. Це, в свою чергу, викликало появу досліджень стосовно ефективності міри близькості часових рядів для вирішення задач кластеризації [3, 4].

Аналіз останніх досліджень. Кластерний аналіз часових рядів використовується для вирішення

багатьох практичних задач. Наприклад, аналіз динаміки захворюваності або станів пацієнтів [5–8], фінансових показників [9], в задачах прогнозування [10], аналізу ризиків [11] тощо.

Як показує аналіз літератури, на практиці при вивченні часових рядів у більшості робіт використовується ієрархічна кластеризація [5, 6, 9], метод кластеризації K - середніх [10, 11], а також нечітка кластеризація K - середніх [12], при якій кластери можуть перетинатися.

Важливу роль в задачах кластеризації відіграють ієрархічні процедури. Ієрархічна процедура починається з того, що кожен об'єкт є окремим кластером. Потім два сусідніх кластера об'єднуються в один, і так далі, і цей процес триває до тих пір, поки не залишаться два кластери.

Метод K - середніх є також одним з найбільш застосованих методів кластеризації [8, 13]. Процедура починається з визначення кількості кластерів і завдання центрів майбутніх кластерів – таких об'єктів, в околі яких формуються кластери. На наступному етапі об'єкти групуються відповідно до їх близькості до центрів кластерів. Процедура кластеризації виконується до тих пір, поки центри не перестануть змінюватись.

До недоліків методу K - середніх можна віднести те, що кількість кластерів не змінюється, а результат залежить від початкового визначення центрів.

Якщо досліджуються короткі ряди, то більшість існуючих методів кластеризації не призначені для їх аналізу.

Що стосується обрання міри близькості між рядами, що є характеристикою ступеня різниці між ними, це є також важливим моментом проведення процедури кластеризації.

Існує три підходи до розрахунку міри близькості між часовими рядами [13]:

1. Підхід, заснований на необроблених даних. Вимірювання відстані обчислюються з використанням вихідних значень аналізованих часових рядів або деяких їхніх характеристик. Найбільш відомі міри відстані цього підходу: Евклідова, Мінковського, Манхеттенська відстані, відстань між періодограмами, відстань між коефіцієнтами автокореляцій рядів та інші.

2. Підхід, заснований на наближеннях часових рядів моделями ARIMA. У цьому підході розрахунок близькості між окремими рядами виконується за значеннями статистичних характеристик моделей. При застосуванні цього підходу будується статистика, що відображає значущість відмінностей процесів, наприклад, коефіцієнти авторегресії або матриці коваріацій рядів та інше.

3. В рамках цього підходу оцінюється рівень інформації, що міститься у кожному з часових рядів. Цей підхід не враховує часові характеристики і особливості процесів, не робить припущень про моделі, які можуть бути використані для апроксимації процесу.

Кожний з перелічених підходів має свою специфіку. Обрання методу дослідження повинне

відповідати цілям задачі, що вирішується.

Оскільки процедура кластерного аналізу проходить в автоматичному режимі без участі дослідників, то дуже складно зробити об'єктивний висновок про ступінь «правильності» отриманих з його допомогою результатів. Як правило, на практиці обирається той результат, який «має сенс» з точки зору розв'язуваної задачі. Однак є низка показників, які можна використовувати для кількісного опису якості кластеризації. Це дає можливість порівняти різні рішення та обрати найбільш «оптимальне». У зв'язку з цим розрахунок таких мір якості зазвичай є частиною алгоритму кластерного аналізу.

Для визначення того, яка кількість класів є оптимальною, вирішальне значення має показник, який обчислює близькість між двома кластерами згідно обраної міри. На тому етапі, де ця міра близькості між двома кластерами збільшується перервами, процес об'єднання в нові кластери необхідно зупинити, тому що були б вже об'єднані кластери, які знаходяться на відносно великій відстані один від одного.

Ступінь наближення результатів до ідеального виконання процедури кластеризації характеризується також функціоналом якості $\frac{F_0}{F_1}$. Для його побудови

обчислюють суму F_0 внутрішньокластерних відстаней між об'єктами в кожному кластері та суму F_1 міжкластерних відстаней між об'єктами, які знаходяться в різних кластерах. У цьому випадку якість розбиття на кластери за допомогою сум F_0 і F_1 оцінюється співвідношенням $\frac{F_0}{F_1}$. Вважається, що найкращому поділу множини $\Omega = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ на кластери відповідає мінімальне значення співвідношення $\frac{F_0}{F_1}$.

Метою роботи є порівняльний аналіз часових рядів даних розповсюдженості окремих видів шкірних захворювань в регіонах України за результатами кластерного аналізу із застосуванням різних мір близькості.

Основний матеріал

Нехай досліджується сукупність $\Omega = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ з m коротких часових рядів з однаковою в часі кількістю вимірювань n . Треба поділити сукупність Ω на групи (кластери) C_1, C_2, \dots, C_k , де $\Omega = C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_k$, $C_i \cap C_j = \emptyset$, $i, j = \overline{1, k}$, $i \neq j$, застосовуючи обрану процедуру ієрархічної кластеризації та міру $D_q(X_i, X_j)$ ($q = 1, 2, 3$) близькості між рядами X_i, X_j ($i, j = \overline{1, m}$).

Математична модель. Нехай задана скінченна множина об'єктів $\Omega = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$. Множиною \mathcal{C} кластерів цих об'єктів називають будь-яку сукупність його непустих підмножин, що не перети-

наються. Таким чином, якщо $C \subseteq 2^\Omega$ – множина кластерів, то

$$\forall C_1, C_2 \in C: (C_1 \cap C_2 \neq \emptyset) \Leftrightarrow (C_1 = C_2).$$

Для вирішення поставленої задачі пропонується провести ієрархічну процедуру (IP) кластерного аналізу, що визнана найбільш застосованою в дослідницьких цілях.

Доведено, що результати кластеризації певним чином залежать від обраної міри близькості між об'єктами – рядами. При проведенні ієрархічної процедури (IP) застосуємо три міри близькості: $D_1(X_i, X_j)$ – Евклідову міру, якою залежність вимірювань від часу ігнорується; $D_2(ST_i, ST_j)$ – міру, що побудована на статистичних ST -характеристиках часових рядів, для яких не враховується залежність від часу; та $D_3(\Delta X_i, \Delta X_j)$ – міру, що побудована на перших різницях

$$\Delta x_i(x_{i,r}, x_{i,r+1}) = x_{i,r+1} - x_{i,r} \quad (i = \overline{1, m}, r = \overline{1, n-1})$$

вимірювань даних часових рядів. Таким чином, буде отримано три варіанта вирішення задачі кластеризації множини $\Omega = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ часових рядів із застосуванням ієрархічної процедури за обраними мірами близькості (табл. 1).

Аналіз отриманих результатів може дати можливість виявити переваги (недоліки) застосування мір близькості типу $D_2(ST_i, ST_j)$ та $D_3(\Delta X_i, \Delta X_j)$ перед найбільш застосованою у дослідженнях мірою відстані $D_1(X_i, X_j)$.

Результати досліджень. В якості об'єкта $\Omega = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ розглянемо $m = 3$ регіонів України, кожен з яких характеризується відповідним часовим рядом X_i ($i = \overline{1, m}$) з однаковою в часі кількістю $n = 13$ вимірювань випадків деяких шкірних захворювань [14]. Для дослідження обрані три з п'яти регіонів України, а саме Східний, Центральний і Західний. Дані розповсюдження захворювань по регіонах представлені на рис. 1.

Поділ часових рядів на кластери проводився ієрархічна процедурою (Hierarchical Cluster) методом Between-groups Linkage (зв'язок між групами) з використанням математичного пакету SPSS Statistics 26.

Перед проведенням кластерного аналізу виконаємо нормування вимірювань часових рядів. Використання L_1 -норми для часових рядів можливе лише у випадку, коли ряди однакової довжини й не мають локального зсуву за часом.

При проведенні ієрархічної процедури (IP) було застосовано три міри близькості:

1) евклідова міра:

$$D_1(X_i, X_j) = \sqrt{\sum_{l=1}^n (x_{il} - x_{jl})^2};$$

2) міра, що побудована на p статистичних ST -характеристиках s_{il} ($i = \overline{1, m}, l = \overline{1, p}$) нормованих вимірювань часових рядів:

$$D_2(ST_i, ST_j) = \sqrt{\sum_{l=1}^p (s_{il} - s_{jl})^2};$$

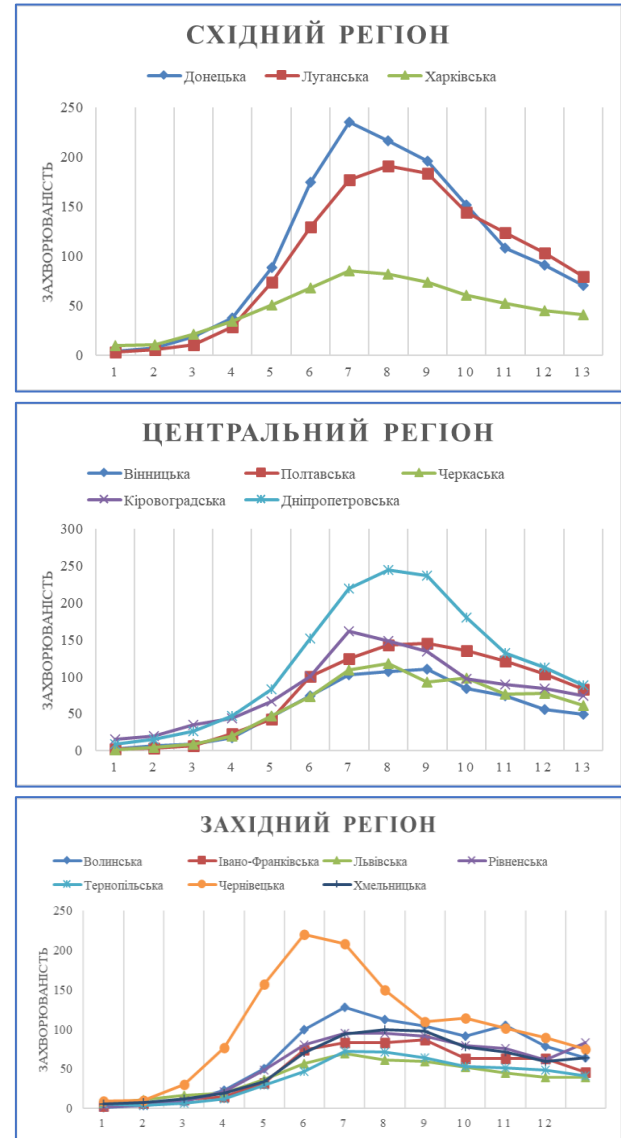


Рис. 1. Захворюваність по регіонах України

3) міра, що побудована для оцінювання близькості між характеристиками динаміки часових рядів. Опис динаміки часових рядів нормованих вимірювань проводився з застосуванням перших різниць з лагом 1: $\Delta x_{ir} = x_{i,r+1} - x_{i,r}$ ($i = \overline{1, m}, r = \overline{1, n-1}$). Нормалізація значень часових рядів дозволяє не звертати увагу на розкиданість спостережень у просторі, а досліджувати тільки поведінку рядів. Для побудови цієї міри введемо позначення: $L_{ir} = \begin{cases} 1, & \Delta x_{ir} \geq 0; \\ 0, & \Delta x_{ir} < 0. \end{cases}$

Очевидно, це перетворення часових рядів відображає динаміку процесу, а точніше, вказує

інтервали неспадання. В цих позначеннях міра $D_3(\Delta X_i, \Delta X_j)$ має такий вигляд:

$$D_3(\Delta X_i, \Delta X_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{r=1}^{n-1} L1_{ir} \oplus L1_{jr},$$

де $L1_{ir} \oplus L1_{jr}$ – покомпонентне додавання за модулем 2.

Додавання за модулем 2 є логічною операцією, результат виконання якої буде істинним тоді і тільки тоді, коли лише один з аргументів істинний. Іншими словами, при обчисленні міри близькості $D_3(\Delta X_i, \Delta X_j)$ між двома рядами враховуються ситуації комбінацій поведінки часових рядів «спадає-зростає» або «зростає-спадає».

Дендрограма виконання процедури $\{IP, D_2(ST_i, ST_j)\}$ в якості характеристик об'єктів дослідження – часових рядів – обрано найпростіші статистичні характеристики, приведена на рис. 2.

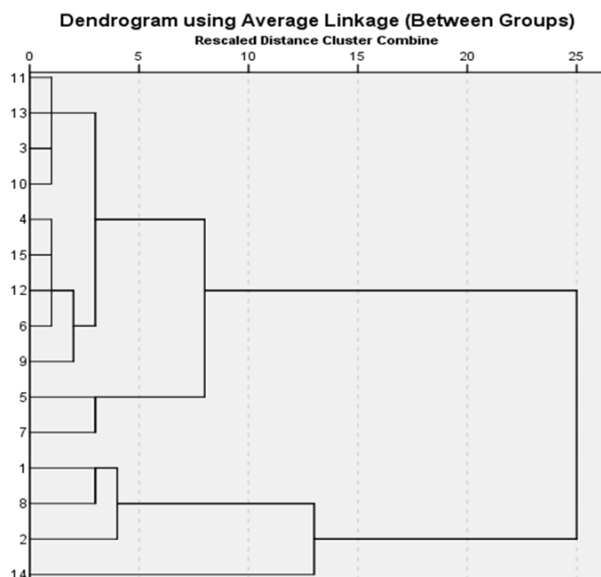


Рис. 2. Дендрограма процесу злиття процедури кластеризації $\{IP, D_2(ST_i, ST_j)\}$

В результаті проведених обчислень маємо два кластери, що складаються з 11 та 4 об'єктів. Для об'єднання всіх об'єктів в один кластер алгоритму знадобилось 25 кроків.

Схожі результати були отримані також при проведенні процедур кластеризації:

$$\{IP, D_1(X_i, X_j)\};$$

$$\{IP, D_3(\Delta X_i, \Delta X_j)\}.$$

Для часових рядів, що розглядались, аналіз дендрограм усіх трьох процедур кластеризації виявив таке:

1. Оптимальна кількість кластерів – 2.
2. Поділи областей регіонів України за кластерами суттєвих відмінностей не мають.
3. Для отримання найкращого поділу часових рядів на кластери в кожній процедурі використаний критерій мінімальності значення співвідношення F_0/F_1 .

Висновки

В роботі були проведені процедури кластерного аналізу коротких часових рядів з трьома мірами близькості:

Евклідова відстань;

міра близькості $D_2(ST_i, ST_j)$, що була побудована на статистичних характеристиках рядів;

міра близькості $D_3(\Delta X_i, \Delta X_j)$, що характеризує динаміку числових рядів.

Як свідчать результати виконання процедур, міри близькості $D_2(ST_i, ST_j)$ і $D_3(\Delta X_i, \Delta X_j)$ в застосуванні процедур кластеризації дають практично однаковий результат поділу множини $\Omega = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ часових рядів на кластери. Це дозволяє застосовувати їх в задачах кластеризації коротких часових рядів і дає впевненість також в надійному застосуванні в якості міри близькості характеристик мінливості часових рядів як послідовності різниць другого порядку.

Результати кластеризації розглянутих числових рядів захворюваності обраних трьох регіонів України у подальшому будуть проаналізовані з ціллю виявлення причин саме такого об'єднання областей регіонів у кластери, а також причин аномальних значень захворюваності деякими шкірними хворобами в окремих містах регіонів. Як правило, ці причини пов'язані з відхиленнями екологічних показників повітря, води тощо. Як саме та яка величина ризиків захворюваності, треба буде встановлювати в окремих дослідженнях.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kaufman L., Rousseeuw P.J. Finding groups in data: An introduction to cluster analysis. – Wiley, 2009. – 355 p. ISBN 0470317485, DOI: <https://doi.org/10.1002/978047031680>
2. Weiss S.M. A novel approximation to dynamic time warping allows anytime clustering of massive time series datasets. *Proceedings of the 2012 SIAM International Conference on Data Mining*. – pp. 999-1010, doi: <https://doi.org/10.1137/1.9781611972825.86>.
3. Giusti R., Batista G.E. An empirical comparison of dissimilarity measures for time series classification. *Proceedings of the Brazilian Conference on Intelligent Systems (BRACIS)*. – 2013. – pp. 82-88, doi: <https://doi.org/10.1109/BRACIS.2013.2>

4. Ding H. et al. Querying and mining of time series data: experimental comparison of representations and distance measures. *Proc. of the VLDB Endowment*. – 2015. – vol. 1, issue 2. – pp. 1542-1552, doi: <https://doi.org/10.14778/1454159.1454226>
5. Dieng S., Michel P., Guindo A., Sallah K., Ba E.H., Cissé B., Carrieri M.P., Sokhna C., Milligan P., Gaudart J. Application of Functional Data Analysis to Identify Patterns of Malaria Incidence, to Guide Targeted Control Strategies. *Int J Environ Res Public Health*. – 2020 Jun 11. – 17(11):4168, doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph17114168>
6. Vasilios Zarikas, Stavros G. Pouloupoulos, Zoe Gareiou, Efthimios Zervas. Clustering analysis of countries using the COVID-19 cases dataset. *Data in Brief*. – Vol. 31, 2020, 105787, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105787>
7. M. C. Lucic, H. Ghazzai, C. Lipizzi and Y. Massoud, "Integrating County-Level Socioeconomic Data for COVID-19 Forecasting in the United States", in *IEEE Open Journal of Engineering in Medicine and Biology*, vol. 2, pp. 235-248, 2021, doi: 10.1109/OJEMB.2021.3096135, doi: <https://doi.org/10.1109/OJEMB.2021.3096135>.
8. Yeongryeol Choi, Nahyeon An, Seokyoung Hong, Hyungtae Cho, Jongkoo Lim, In-Su Han, Il Moon, Junghwan Kim, Time-series clustering approach for training data selection of a data-driven predictive model: Application to an industrial bio 2,3-butanediol distillation process, *Computers & Chemical Engineering*, Volume 161, 2022, 107758, ISSN 0098-1354, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107758>.
9. Кучанський, О. Ю., Білощицький, А. О. (2015). Selective pattern matching method for time-series forecasting. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(4(78)), 13-18. URL: https://www.researchgate.net/publication/288323553_Selective_pattern_matching_method_for_time-series_forecasting.
10. Laurinec, Peter and Lucká, Mária. "Clustering-based forecasting method for individual consumers electricity load using time series representations", *Open Computer Science*, vol. 8, no. 1, 2018, pp. 38-50, doi: <https://doi.org/10.1515/comp-2018-0006>.
11. Perova I., Bodyanskiy Ye. Adaptive fuzzy clustering based on Manhattan metrics in medical and biological applications. *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*, № 826, 2015. – С. 8-12. URL: https://sci.lubgd.edu.ua/bitstream/123456789/1053/1/Vis_826_Komp-nauky_min.pdf.
12. Song, C., Pei, T., Wang, X., Liu, Y., Ma, J., & Zhou, D. (2022). Dynamic characteristics of the COVID-19 epidemic in China's major cities. *Annals of GIS*, 28(4), 445-456, doi: <https://doi.org/10.1080/19475683.2022.2026468>.
13. T. Warren Liao, Clustering of time series data – a survey, *Pattern Recognition*, Volume 38, Issue 11, 2005, Pages 1857-1874, ISSN 0031-3203, doi: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2005.01.025>.
14. Солошенко Е. М., Волкославська В. М., Гутнев О. Л. Динаміка розповсюдженості та захворюваності на поширені дерматози в Україні і Харківському регіоні за останні 10 років. *Дерматологія та венерологія*. – 2014. – № 1. – С. 68-77. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/dtv_2014_1_11.

Received (Надійшла) 14.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Чікіна Наталія Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри вищої математики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

Chikina Nataliia – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Higher Mathematics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: nataliia.chikina@khp.edu.ua; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-0643-1771>.

Антонова Ірина Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Antonova Iryna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: iryana.antonova@khp.edu.ua; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-1268-8223>.

Comparative analysis of time series

Nataliia Chikina, Iryna Antonova

Abstract. Relevance. Statistical data on most social, demographic, medical, and environmental indicators are typically collected on an annual basis. Such series are available only for small amounts of data over several years, i.e., they are short time series. Most existing clustering methods are not suitable for analysing short time series. Therefore, it is important to present information about numerical series in such a way that it is sufficient for the purposes of clustering short time series. Recently, publications have appeared in the scientific literature with recommendations to provide additional information contained in the statistical indicators of time series measurements, as well as indicators that describe the dynamics of time series, their variability, but do not depend on time. The task of selecting measures of proximity of series remains relevant. Existing studies on the comparative analysis of proximity measures tend to suggest that Euclidean distance ranks first in terms of quality in time series clustering tasks. **Object of study:** short time series of data on the prevalence of certain types of skin diseases in the regions of Ukraine. **Purpose of the article:** comparative analysis of the results of clustering short time series obtained using different proximity measures. **Research results.** The study examines time series of data on the number of cases of various skin diseases in the regions of Ukraine over a specified period. The results of clustering such time series make it possible to perform a comparative analysis of data and identify groups of regions of Ukraine with a «similar» situation in this regard. **Conclusions.** The results obtained can be used in further research to identify the causes of the corresponding levels of morbidity, such as water quality, air quality, and environmental pollution. To solve this problem, in addition to the Euclidean distance measure, the authors use a measure of proximity based on the main statistical characteristics of the time series and a measure of proximity for the dynamics indicators of the studied series, namely, the series of their first differences. A hierarchical procedure was selected from among the clustering methods for time series. A comparative analysis of the results obtained was carried out.

Keywords: mathematical modelling; short time series; comparative analysis; hierarchical cluster analysis procedure; measures of proximity; dendrogram; quality functional.

Anatolii Shostak

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine

COMPARATIVE EXPERIMENTAL ANALYSIS OF METHODS FOR IMPLEMENTING THE AVL TREE

Abstract. The paper presents an experimental proof of the difference between two computational models of AVL trees: the classical online balanced AVL tree and the canonical median tree constructed on the basis of a sorted array of keys. Despite close asymptotic estimates of the complexity of search, insertion, and deletion operations, these implementations of AVL trees demonstrate fundamentally different behavior in practice. The study analyzes the impact of balancing strategy, tree shape, and search operation implementation method on the performance of search, key insertion, and deletion operations, as well as AVL tree creation. It is shown that using binary search on a sorted array of keys in a canonical AVL tree significantly improves the search time, but leads to linear complexity of insertion and deletion operations. The results confirm that the considered implementations are optimal for different load classes and are not interchangeable. The main contribution of this work is the experimental proof that canonical AVL trees and online AVL trees are fundamentally different computational models rather than competing implementations.

Keywords: computational model, AVL tree, binary search, asymptotic analysis.

Introduction

Height-balanced binary search trees are a fundamental data structure widely used in systems and applied programming. AVL trees [1–3], proposed by G. M. Adelson-Velsky and E. M. Landis, guarantee logarithmic tree height through a strict height-balanced condition and local rotations.

The classic implementation of an AVL tree [1-3] is focused on an online model in which each insertion or deletion operation immediately restores the tree's balance.

However, in practice, there are alternative scenarios for using AVL trees in which the tree is built in batches, and search operations dominate modification operations. Such scenarios arise in workloads with, for example, read-dominant data, static indexes, and autonomous analytics pipelines.

This paper considers two approaches:

- AVL(A) – a classical online AVL tree balanced by rotations;
- AVL(B) – a canonical AVL tree constructed using the median method from a sorted array of unique keys and completely rebuilt for each insertion and deletion.

AVL trees are traditionally analyzed in terms of the asymptotic complexity of operations, the number of rotations, and upper bounds on the height [1–3]. However, relatively few studies have been devoted to the experimental analysis of alternative implementations of AVL trees, in particular, canonical trees of a fixed shape constructed from sorted data, i.e., using data from preorder and inorder traversals of the tree.

Such approaches are more often considered in the context of static binary search trees (BSTs) or optimal search trees.

This work complements existing studies [4–6] by demonstrating practical differences between online and batch AVL tree balancing models.

The aim of the work is to experimentally compare the AVL(A) and AVL(B) approaches in terms of execution time of operations of creating an AVL tree, searching, inserting and deleting keys.

Main part

The classic AVL tree AVL(A) implements the standard AVL tree algorithm [1-3]: - insertion and deletion are performed recursively, - height balance is maintained through single and double rotations, - tree height is maintained within $O(\log n)$. This implementation is optimal for scenarios with frequent tree structure changes.

An AVL(A) tree depends on the insertion order of keys, allows multiple shapes for the same set of keys, and guarantees only height balance, not shape minimality. A canonical median AVL tree, AVL(B), is constructed as follows: - the input array of keys is cleared of duplicates, - the keys are sorted, - the tree is built recursively, choosing the median of the sorted array as the root.

The result is a canonical AVL tree of minimum height and minimum node depth variance among all binary search trees on the same set of keys.

A canonical tree for a set of keys means that it is a binary search tree that: - depends only on the set of keys, - does not depend on the order in which keys are inserted into the tree, - has the minimum possible height, and - can be reconstructed from the set of keys in a unique way.

A key feature of the implementation is the storage of a sorted array of keys, which is used not only to construct the tree but also to perform search operations via binary search. Insertion and deletion operations are implemented as complete tree rebuilding.

For the experiments, arrays of unique integer keys, generated uniformly at random within a given range, were used. Input data sizes ranged from 5,000 to 25,000 elements.

The following operations were evaluated: Create – constructing a tree from an array of keys, Insert – sequentially inserting elements, Delete – sequentially deleting elements, and Search – searching for keys.

For the Delete operation, two scenarios were considered: 1) a complete deletion of all tree keys, 2) a partial deletion of tree keys (after deleting nodes, the tree remained non-empty).

For the Search operation, three scenarios were considered: 1) all searched keys are present in the tree,

2) none of the searched keys are present in the tree, 3) half of the searched keys are present in the tree and the other half are not.

The following metrics were recorded in the experiments: - operation execution time, - tree height after the operation, - average tree node depth, - tree node depth variance, - number of rotations (for AVL(A)).

Experiments with the Create operation for random keys uniformly distributed in the range (0, 50000) showed (Table 1, Fig. 1–4) that AVL(B) significantly outperforms AVL(A) in tree construction time. This is explained by the linear complexity of median construction and the absence of rotations in AVL(B).

Table 1 – Experiment results for the Create operation

type	n	tMs	h	avgD	varD	leftR	rightR
AVL(A)	5000	2,51	13	10,48	2,69	1664	1663
AVL(B)	5000	2,08	12	10,28	2,17	0	0
AVL(A)	10000	5,27	14	11,42	2,76	3161	3164
AVL(B)	10000	4,2	13	11,19	2,14	0	0
AVL(A)	15000	8,19	15	11,95	2,88	4516	4514
AVL(B)	15000	6,00	13	11,74	2,18	0	0
AVL(A)	20000	11,22	15	12,31	2,83	5755	5756
AVL(B)	20000	7,64	14	12,01	2,00	0	0
AVL(A)	25000	14,29	16	12,57	2,82	6872	6868
AVL(B)	25000	9,66	14	12,34	2,21	0	0

In Table 1, type is the type of AVL tree, n is the size of the key array, tMs is the operation execution time in Ms, h is the height of the tree after the operation is executed, avgD is the average depth of tree keys, varD is the depth variance, leftR, rightR are the number of left and right rotations, respectively, for AVL(A).

AVL(B) minimizes tree height globally, while AVL(A) minimizes it only locally (Table 1, Fig. 1). Moreover, AVL(A) has a consistently higher tree height, and compared to AVL(B), the difference in heights increases with n.

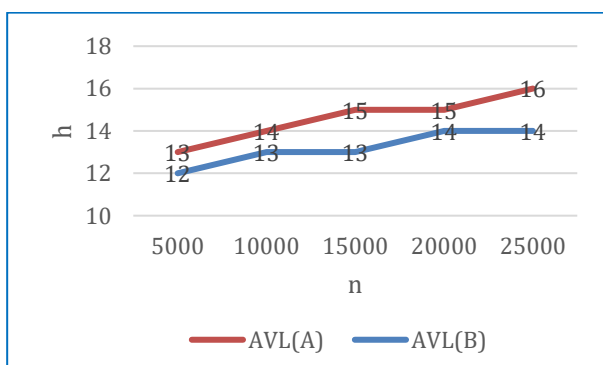


Fig. 1. Dependence of the tree height h on the number of elements n in the tree

The AVL(B) tree is constructed faster, while the AVL(A) tree must spend significant time on comparisons, height determinations, and rotations (Table 1, Fig. 2). For AVL(A), the number of left and right rotations is

approximately equal and increases approximately linearly with the number of keys n (Table 1).

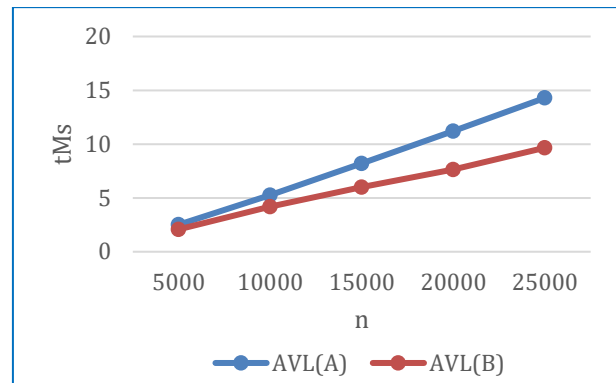


Fig. 2. Dependence of the execution time of the Create operation on n

The average key depth avgD for AVL(B) is smaller than for AVL(A) for all n (Table 1, Fig. 3). This will ensure that AVL(B) requires fewer comparisons during search.

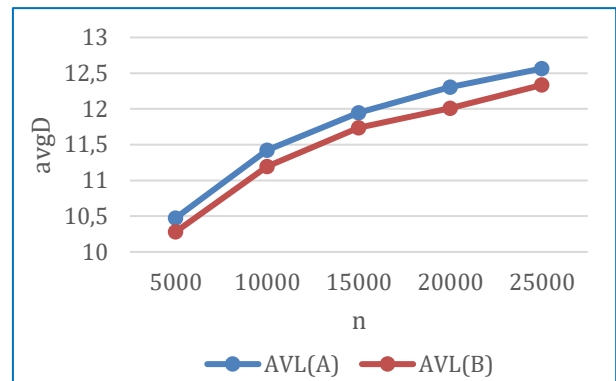
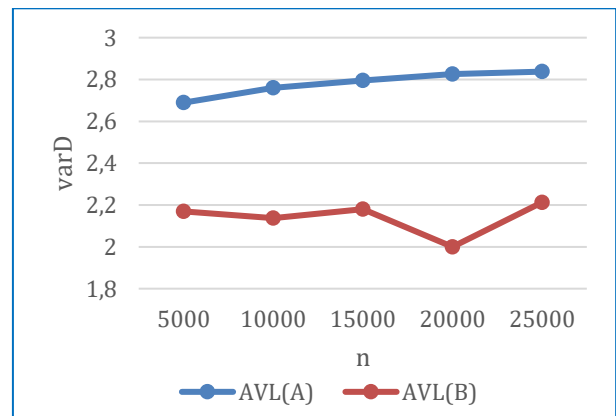


Fig. 3. Dependence of the average key depth avgD on n

The variance of key depth varD is lower and more stable for AVL(B), while it is higher for AVL(A) (Table 1, Fig. 4), since the shape of the AVL(A) tree depends on the insertion order of keys.



For insertion and deletion operations, AVL(A) demonstrates significantly better performance (Table 2). Despite the poorer tree structure and the presence of rotations, the O(log n) asymptotics of operations ensures fast execution time.

Table 2 – Ratio of times (tMs AVL(B) / tMs AVL(A)) for executing an insert operation and two scenarios for the delete operation

n	Ratio of times		
	Insert	Delete	
		1)	2)
5000	658	1122,4	1483,4
10000	1864,1	2027,8	2480,3
15000	2398,6	2567,9	3153,2
20000	3133,3	3151,6	3654,4
25000	3656,1	3696,4	4024,2

AVL(B), despite its more compact tree form (lower height and average depth), exhibits linear complexity of $O(n)$ operations, since each operation results in a complete tree rebuild.

The dependence of the ratio of insertion and deletion times on n for the two approaches, AVL(B) and AVL(A), respectively, shows a linear increase with increasing n and a significant advantage for the AVL(A) approach (Table 2, Fig. 5 and 6).

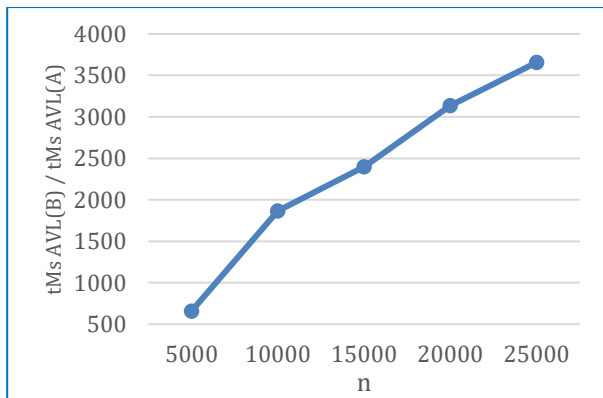


Fig. 5. Dependence of the ratio of execution times of the insert operation on n for two approaches AVL(B) and AVL(A)

For all dimensions n , scenario 1) (complete deletion of all tree keys) shows a lower time ratio for the two approaches, AVL(B) and AVL(A), respectively, compared to scenario 2) (partial deletion of tree keys) (Table 2, Fig. 6).

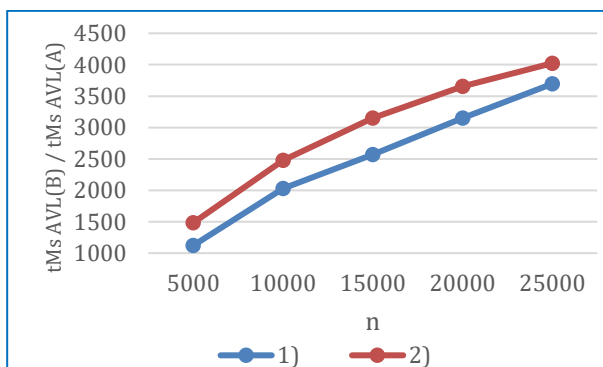


Fig. 6. Dependence of the ratio of times for two scenarios of performing the deletion operation on n for two approaches AVL(B) and AVL(A)

Although deletion in AVL(A) is algorithmically more complex than insertion, its cost remains logarithmic

due to local rebalancing. In contrast, AVL(B) performs a complete rebuild for these operations; however, deletion additionally destroys the structural locality accumulated during construction, resulting in poor cache performance and higher constant coefficients.

Three scenarios were considered for the search operation:

1) all searched keys are present in the tree – search for $k=1000$ keys, where $p=500$ keys are present in the tree and $m=500$ are not;

2) none of the searched keys are present in the tree – $k=1000, p=0, m=1000$;

3) half of the searched keys are present in the tree and the other half are not – $k=1000, p=500, m=500$.

When using search, the AVL(A) and AVL(B) approaches demonstrate comparable times (Table 3, Fig. 7), with the differences between the search scenarios being virtually indistinguishable.

Using binary search over the underlying sorted key array in the AVL(B) search operation results in a noticeable speedup. This approach preserves the tree structure for structural analysis.

Table 3 – Ratio of execution times (tMs AVL(B) / tMs AVL(A)) for three search operation scenarios

n	Search scenario		
	1)	2)	3)
5000	1,05	1,04	1,02
10000	1,02	1,15	1,08
15000	0,97	0,96	0,92
20000	0,98	0,93	1,01
25000	1,03	1,09	0,98

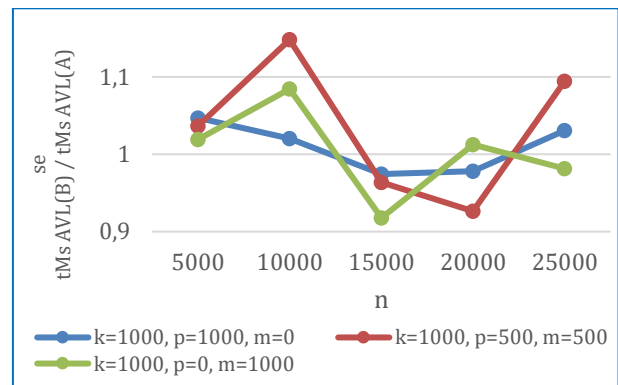


Fig. 7. Ratio of times for three scenarios of performing a search operation from n for AVL(B) and AVL(A)

AVL(B) has a strictly minimal height and the smallest depth variance (Table 1). AVL(A), despite meeting the balancing conditions, produces trees with greater shape variability, which can negatively impact access locality and search time (Tables 1, 3).

The results show (Tables 1-3) that the choice of AVL tree implementation should be determined by the nature of the workload:

- for dynamic scenarios with frequent insertions and deletions, the classic online implementation is preferred;
- for static or search-oriented scenarios, the canonical AVL tree with binary array search provides better performance and predictability.

Thus, AVL(A) and AVL(B) represent different algorithmic paradigms, not competing optimizations of the same data structure.

Conclusions and future directions

This paper presents a systematic experimental comparison of two conceptually different approaches to AVL tree construction and maintenance: the classical online balanced AVL tree (AVL(A)) and the canonical median-based AVL tree with complete rebuilding (AVL(B)).

Experimental results show that, despite identical asymptotic search complexity, the two approaches exhibit fundamentally different performance characteristics due to their underlying computational models. AVL(A) maintains balance gradually through local rotations and is therefore optimal for dynamic workloads dominated by insertion and deletion operations. In contrast, AVL(B) constructs a canonical tree using sorted keys and completely avoids rotations, achieving minimal variance in tree height and depth.

The key result of this work is that replacing the tree-based search in AVL(B) with binary search over an underlying sorted array of keys significantly improves search performance, making it comparable to or faster

than AVL(A). This highlights the importance of separating the logical tree structure from the physical data representation used to execute queries.

At the same time, the batch rebuild strategy used by AVL(B) results in insertions and deletions in linear time, making it unsuitable for workloads with intensive online updates. However, in search-dominant or static scenarios, AVL(B) provides excellent structural optimality and predictable performance characteristics.

Overall, the results confirm that AVL(A) and AVL(B) are not competing implementations of the same data structure, but rather represent distinct algorithmic paradigms optimized for different workload profiles. Therefore, the choice between them should be determined by the relative frequency of update and query operations, as well as the requirements for determinism and structural canonicity. Future research directions include experimentally studying the influence of the AVL tree shape and its height on search time while maintaining balancing conditions, and considering hybrid approaches combining the canonical form and partial online balancing.

Use of Artificial Intelligence Tools. The author confirm that artificial intelligence technologies were not used in the creation of the presented work.

REFERENCES

1. Adelson-Velskii M., Landis E.M., An algorithm for the organization of information. Proceedings of the USSR Academy of Sciences, 1962. 146. – pp.263–266. URL: <https://zhjwpu.com/assets/pdf/AED2-10-avl-paper.pdf>
2. Cormen Thomas H., Leiserson Charles E., Rivest Ronald L., Clifford Stein. Introduction to algorithms. – MIT Press, 2022. – 1312 pp. URL: <https://www.cs.mcgill.ca/~akroit/math/compsci/Cormen%20Introduction%20to%20Algorithms.pdf>
3. Chauhan S., Thakur S., Rana S., Sharma S. A brief study of balancing of AVL tree. International Journal of Research (IJR). Vol. 1, Issue 11, 2014, pp. 406-408, URL: <https://scispace.com/pdf/a-brief-study-of-balancing-of-avl-tree-53a0i1etow.pdf>
4. Sedgewick R., Wayne K., Algorithms: / Sedgewick R. Princeton University, Addison-Wesley, 2011. 955 pp. URL: <https://algs4.cs.princeton.edu/home/>
5. Wiener R. AVL Trees //Generic Data Structures and Algorithms in Go: An Applied Approach Using Concurrency, Genericity and Heuristics. Berkeley, CA : Apress, 2022. C. 315-347, https://doi.org/10.1007/978-1-4842-8191-8_10
6. Bounif L., Zegour D. E. Toward a unique representation for AVL and red-black trees. Computación y Sistemas, Vol. 23, No. 2, 2019, pp. 435–450, doi: <https://doi.org/10.13053/CyS-23-2-2840>

Received (Надійшла) 25.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Шостак Анатолій Васильович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки Національного аерокосмічного університету України «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна;

Anatoli Shostak – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of a Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity of the National Aerospace University of Ukraine "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: a.shostak@csn.khai.edu; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0003-7687-3641>

Порівняльний експериментальний аналіз способів реалізації АВЛ-дерева

А. В. Шостак

Анотація. У роботі проводиться експериментальний доказ відмінності двох обчислювальних моделей AVL-дерева: класичного онлайн-балансованого AVL-дерева та канонічного медіанного, що будується на основі відсортованого масиву ключів. Незважаючи на близькі асимптотичні оцінки складності операцій пошуку, вставки та видалення, дані реалізації AVL-дерев демонструють принципово різну поведінку на практиці. В рамках дослідження аналізується вплив стратегії балансування, форми дерева та способу реалізації операції пошуку на продуктивність операцій пошуку, вставки та видалення ключів, а також створення AVL-дерева. Показано, що використання бінарного пошуку за відсортованим масивом ключів у канонічному AVL-дереві суттєво покращує час пошуку, проте призводить до лінійної складності операцій вставки та видалення. Результати підтверджують, що аналізовані реалізації оптимальні для різних класів навантажень і не взаємозамінні. Основний внесок цієї роботи полягає в експериментальному доказі того, що канонічні AVL-дерева та онлайн-AVL-дерева є принципово різними обчислювальними моделями, а не конкуруючими реалізаціями.

Ключові слова: обчислювальна модель, AVL-дерево, бінарний пошук, асимптотична оцінка.

Valerii Yaroviy, Olesia Barkovska, Dmytro Maksymov, Yana Ni, Daniil Raptanov

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

METHODS FOR RECOGNISING HAND GESTURES USING COMPUTER VISION TO ASSIST PEOPLE WITH MOVEMENT OR SPEECH IMPAIRMENTS

Abstract. Relevance. Real-time hand gesture recognition systems play an important role in the development of modern technologies for human interaction with the “smart environment.” They create conditions for contactless device control and open up new communication opportunities for people with speech or motor impairments. **The object of research.** The object of research is a real-time hand gesture recognition system using computer vision and machine learning methods. The research problem is to create an accessible and effective means of communication for people with speech or motor impairments, as well as to expand the possibilities of controlling devices and elements of a “smart home” without physical contact or voice commands. **Purpose of the article.** The purpose of this article is to investigate and compare different methods for real-time hand gesture recognition using computer vision and machine learning. Specifically, the study evaluates the performance of MediaPipe Hands versus YOLOv8 for detecting and classifying hand gestures. The aim is to identify which approach provides higher accuracy and better adaptability for applications such as assistive communication for people with speech or motor impairments. **Research results.** In the course of the work, a prototype system was developed that combines video processing technologies (GStreamer or FFmpeg), the MediaPipe Hands library for determining key points of the hand, and CNN or LSTM deep learning models for classifying gestures and movement sequences. The results demonstrated the possibility of accurate gesture recognition in real time, as well as flexible adaptation to individual user characteristics. **Conclusions.** Interpretation of the results showed that the effectiveness of the system is due to the use of a comprehensive approach: the combination of 3D coordinate detection of key hand points with a neural network allowed high stability to be achieved even under changing lighting or background conditions. A distinctive feature of the proposed solution is the ability to recognise sequences of gestures that form phrases or commands (for example, “I want to drink”), as well as a function for teaching user gestures to expand the system’s individual vocabulary. The developed technology can be used in assistive communication systems for people with disabilities, in medical and rehabilitation facilities, as well as for controlling smart home elements. Its implementation contributes to increasing the accessibility of digital technologies and improving the quality of life of users.

Keywords: gesture, recognition, computer vision, MediaPipe Hands, neural networks, assistive technologies.

Introduction

In today’s world of rapid technological development, systems that provide comfortable HCI (human-computer interaction) occupy a special place [1]. One of the most promising areas in this field is hand gesture recognition using computer vision. The scientific subject of the work combines methods of artificial intelligence, machine learning, biomechanics, and cognitive sciences. This area opens up new opportunities for creating interfaces that perceive a person not as

a user or operator of a device, but as an active participant in the communication process, since non-verbal communication plays a decisive role in our daily interactions, conveying approximately 65% of human messages, compared to verbal communication, which accounts for only 35% [2].

The scientific relevance of this topic lies in the fact that gesture recognition is one of the key elements in the development of intelligent assistive systems, human-centred technologies and the “smart environment” (Fig. 1).

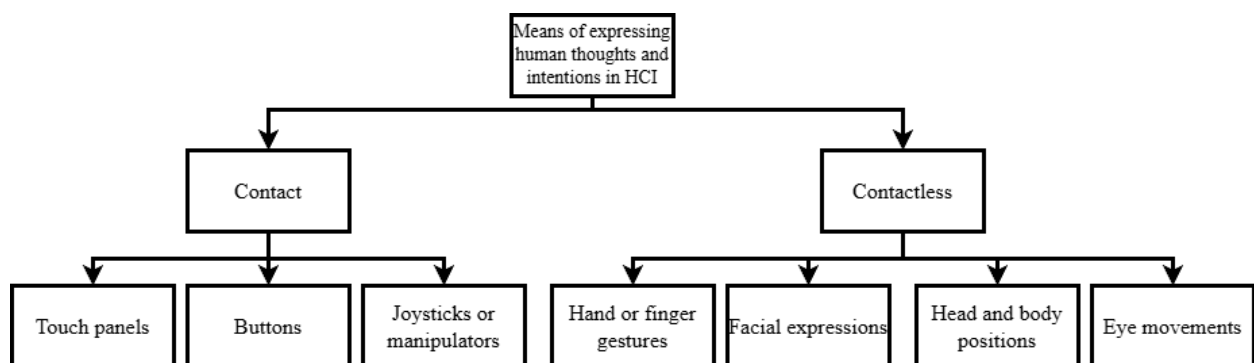


Fig. 1. Classification of means of expressing human thoughts and intentions in HCI

Among the new forms of interaction, gesture-based interfaces are becoming increasingly popular due to their intuitiveness, efficiency, and flexibility [3].

Gestures are a special means of expressing thoughts and intentions that do not require words or physical contact. It is a type of body language in which the

position and shape of the palm and fingers convey certain information [4]. Systems capable of interpreting hand gestures can provide a new level of accessibility and autonomy for people with disabilities, as well as increase the efficiency of controlling technical devices in everyday life, medicine, or even industry.

Gesture recognition methods are usually divided into two main types (Fig. 2).

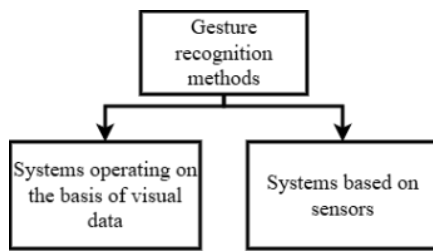


Fig. 2. Existing gesture recognition methods

Visual approaches use cameras to track hand movements or poses and, if necessary, depth sensors to provide more accurate three-dimensional analysis [5].

Gesture recognition has a number of specific features that must be taken into account when developing intelligent interaction systems.

Unlike standard users, the gestures of persons with disabilities may:

- differ in amplitude, trajectory, speed, and stability of movement;
- have a limited range of motion;
- be compensatory (e.g., in Tourette's syndrome), which complicates classification.

Therefore, systems must adapt to the individual motor skills of the user, analysing not only the absolute coordinates of the fingers, but also the relative proportions and dynamics of movements over time.

At the same time, analysis of existing solutions reveals a number of systemic limitations (Table 1).

Table 1 – Limitations of existing gesture recognition systems

No.	Limitation	Explanation
1	System flexibility	The number of gestures needs to be optimised, as experimental prototypes typically use a fairly limited vocabulary of gestures.
2	Accuracy and reliability of recognition	Ensuring high accuracy and reliability of algorithms in real operating conditions is one of the key problems in gesture recognition [6].
3	Response time	This manifests itself in delays between the execution of a gesture and the system's response, creating a feeling of "slow" interaction when the user is forced to wait for the system's reaction or repeat a certain gesture.
4	Lack of context for gesture execution	The system can recognise the shape of the hand, but does not understand in which environment or for what purpose the gesture is being used.
5	Not adapted for people with disabilities	The system's algorithms are designed for standard range and speed of movement, which makes them inaccessible to people with motor impairments.
6	Limitations on gesture sequence recognition	The systems are unable to correctly interpret complex or rapid combinations of movements – they "lose" part of the gestures, confuse their order, or respond only to individual movements rather than their logical sequence.

The practical significance of gesture recognition lies in its wide range of applications:

- in virtual environments, gesture recognition technologies create more natural and realistic interfaces;
- in robotics, it provides contactless control of manipulators;
- in medicine and rehabilitation, it forms the basis of assistive solutions for people with speech or motor impairments;
- in smart home systems, such technologies increase the comfort, safety, and level of personalisation of living space, allowing the user to interact with appliances without touch or voice commands.

In automated solutions, the hand is considered the main area for data collection [6]. Thus, research in the field of hand gesture recognition using computer vision and machine learning is an extremely relevant area of modern science. It is important both for the development of the theoretical foundations of computer vision and for the practical creation of technologies that improve the quality of life of people, especially those with physical limitations. That is why the study, improvement, and implementation of gesture recognition methods is a promising and socially significant task that requires further scientific research.

Review of recent studies and publications.

Among the external factors, technical characteristics of the hardware, and physical characteristics of the user that limit the accuracy of gesture recognition systems, the following can be highlighted:

- analysis of the shape of the object, which makes it possible to track the position of the hands, changes in the configuration of the fingers and the trajectory of movements in space;

- the parameters of the camera's optoelectronic path – resolution, frame rate, dynamic range, and sensor sensitivity determine image quality. For example, if the camera is located outside the room, in conditions of excessive or uneven lighting, the YOLOv8 model may experience failures in gesture recognition [7].

- lighting conditions and optical distortions – changes in light intensity, the appearance of shadows, blurring or distortion of perspective can significantly affect the accuracy of hand contour detection;

- Skin texture and colour – recognising colour and tonal characteristics makes it possible to separate hands from the background or other objects in the frame, which increases the stability of the algorithm in real conditions.

Given that the camera parameters are known before the start of the study, the results need to be interpretable and a decision needs to be made as quickly as possible for objects such as human gestures.

The MediaPipe Hands method is based on a combination of geometric principles and elements of neural image analysis. The algorithm operates in two consecutive stages: first, the BlazePalm Detector module determines the area of the frame where the palm is located, after which the Hand Landmark Model calculates the coordinates of 21 control points of the hand

in three-dimensional space. Unlike classic deep neural networks, MediaPipe supports both 2D and 3D key points and requires few computational resources, making it ideal for lightweight, real-time applications [8].

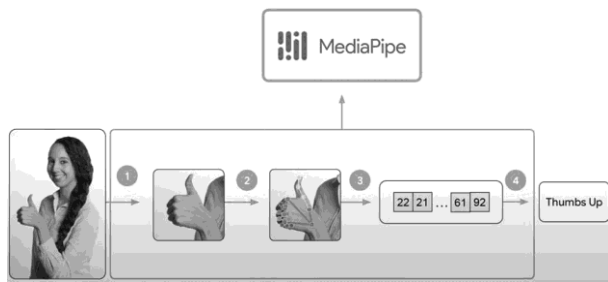


Fig. 3. Sequence of the MediaPipe Hands library gesture recognition method

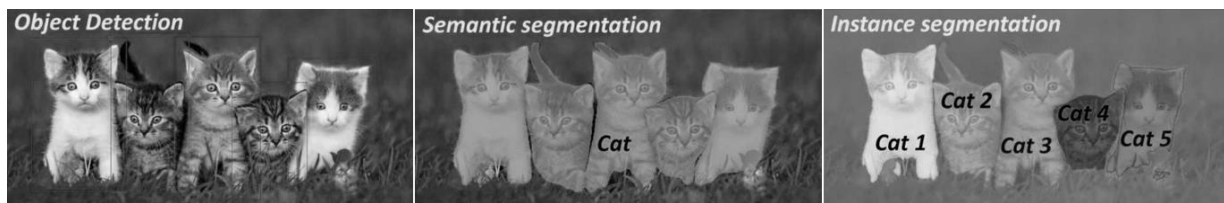


Fig. 4. Sequence of the YOLOv8 model object recognition method

The structure of YOLOv8 is divided into two key components: the base network and the detection head. The base network extracts various rich features from the input image at different scales. On the other hand, the detection head takes on the task of combining these features and generating various high-quality predictions for bounding boxes [10].

YOLOv8 is distinguished by its high recognition accuracy, thanks to the improved CSPDarknet and PAN-FPN architectures, which ensure effective hand detection even in cases of overlap, lighting fluctuations, or small object sizes. Another important feature of YOLOv8 is its ability to work in real time. Optimisation of the inference process for graphics processing units (GPUs) provides speeds of up to 60-120 frames per second, allowing gestures to be tracked with high accuracy even when the user is actively moving.

At the same time, YOLOv8 requires significant computing resources and does not provide direct determination of three-dimensional joint coordinates, as implemented in MediaPipe.

The purpose of this work is to compare two methods of hand gesture recognition and analyse the influence of external factors on the accuracy of gesture detection indoors. To do this, we plan to use a heuristic method based on the MediaPipe library and the YOLOv8 neural network, which implements a modern approach to object recognition.

The main idea is to determine which of the approaches - traditional (MediaPipe, using rules and coordinates of key points of the hand) or neural network (YOLOv8, with training on images/videos) provides higher accuracy, stability, and speed under different shooting conditions (lighting, background, resolution, and the peculiarities of gesture display by a person with a disability). To achieve the set goal, the following tasks must be solved:

The MediaPipe Hands algorithm is characterised by highly interpretable results, as it returns the coordinates of key points on the hand, allowing the position of joints and the angular relationships between fingers to be visualised and possible recognition errors to be controlled. The system remains stable to changes in lighting and noise thanks to the spatial structure of the hand analysis, which ensures correct operation even when the background changes or is partially shaded – from 1200 to 100 lumens.

The YOLOv8 (You Only Look Once, version 8) method implements a deep learning approach based on convolutional neural networks (CNN) for fast and accurate object recognition [9]. CNNs, in turn, allow you to simultaneously detect objects and determine their key points (pose estimation) in real time.

1. Justify the choice of gesture recognition methods, conduct an analytical review of modern approaches to gesture detection and classification based on computer vision. Consider the advantages and limitations of MediaPipe (heuristic approach using key points) and YOLOv8 (deep learning based on images/videos).

2. Determine the specifics of the influence of external factors. Investigate how changes in shooting conditions – lighting, camera resolution, noise level, viewing angle, as well as individual characteristics of users (in particular, people with motor impairments) affect the accuracy of gesture recognition.

3. Develop a software prototype of a gesture recognition module based on the results of a comparative analysis of recognition methods.

4. Conduct a series of comparative tests of both methods under controlled and variable conditions (with different levels of lighting, noise, and different positions of a given gesture). Determine the accuracy, speed, and stability of the systems.

5. Perform a comparative analysis of the effectiveness of the two approaches, determine the optimal conditions for their use, and formulate recommendations for the practical application of each method in assistive systems for people with disabilities.

Further development of the system – analyse potential additional functions (e.g., voice messages that communicate the user's intentions based on the semantic sequence of gesture commands). Consider integrating the system with assistive technologies or a "smart home" to ensure user autonomy.

Main part

A detailed model of the hand gesture recognition process is shown in figure 3. The model includes five interrelated functional modules:

- image capture – a video stream from a camera is used, which provides continuous data updates for further processing. At this stage, individual frames suitable for analysis are formed;

- hand detection – each frame is analysed to determine the coordinates of the hand within the image. For this purpose, detection algorithms based on neural network models are used, which allow the area of the hand to be accurately localised even in difficult lighting conditions;

- context detection – the scene is analysed to take into account the environment, the position of the hand relative to other objects or the user. This allows for increased recognition accuracy by taking additional factors into account;

- gesture detection – performed based on hand coordinates and scene context. The feature description algorithm generates descriptors that reflect finger configuration, palm orientation, and movement characteristics.

- gesture classification – completes the recognition process. At this stage, the system uses a classifier and computational models to analyse the obtained descriptors and determine the corresponding gesture class. The result of the module’s work is the identification of a sequence of hand gestures over time.

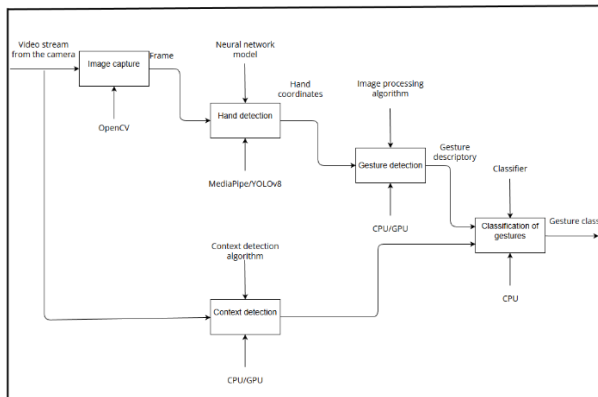


Fig. 5. IDEF0 diagram of the system

The order of the experiments is as follows: we record the actual distance from the camera to the hand

(using a ruler or laser rangefinder), place the camera in a stable position (tripod or fixed surface), launch the gesture recognition algorithm (MediaPipe Hands or YOLO), perform a set of standard gestures at different distances and under different lighting conditions, record the recognition results and compare them with real gestures, determining the accuracy and error (Fig. 6).

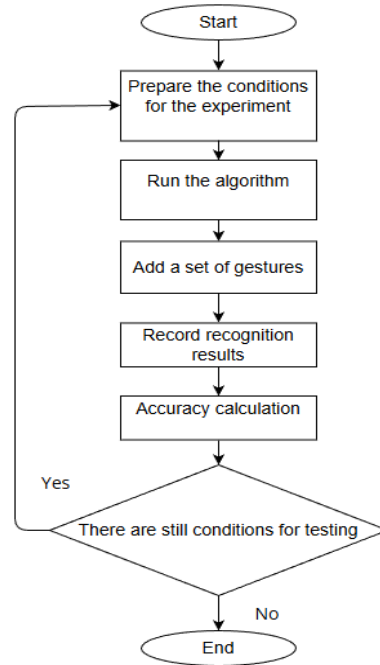


Fig. 6. Flowchart of the experiment algorithm

The experiment investigates the effect of camera resolution (320x240, 640x480) and lighting conditions (bright – 1200 lumens, medium – 500 lumens, low – 100 lumens) on the accuracy of gesture recognition (Fig. 7). The hypothesis of the experiment is that the further the object is from the camera, the more difficult it is for the system to correctly identify the gesture, as the number of pixels that “describe” the hand decreases. In addition, in poor lighting conditions, the algorithm may incorrectly recognise contours and key points, which also reduces the accuracy of gesture recognition.



Fig. 7. Set of gestures recognised by the implemented systems based on MediaPipe Hands and YOLOv8 models

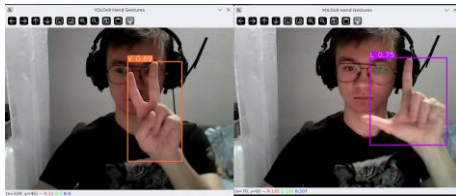


Fig. 8. Demonstration of the experiment conducted on recognising the V and L gestures using the YOLOv8 model in good lighting conditions (approximately 1200 lumens)

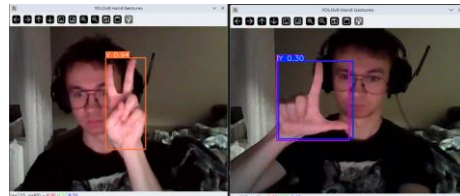


Fig. 11. Demonstration of the experiment conducted on the recognition of V and L gestures using the YOLOv8 model in average lighting conditions (approximately 500 lumens)

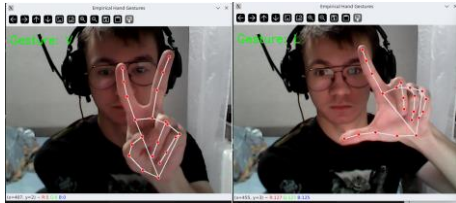


Fig. 9. Demonstration of the experiment conducted on recognising the V and L gestures based on MediaPipe methods in good lighting conditions (approximately 1200 lumens)

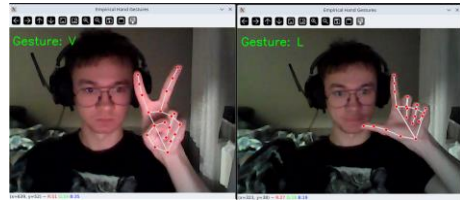


Fig. 12. Demonstration of the experiment conducted on the recognition of V and L gestures based on MediaPipe methods in average lighting conditions (approximately 500 lumens)

From the results of the experiments shown in figure 10, we can see that when the resolution is reduced, the YOLOv8 model demonstrates a higher recall rate – that is, it better detects the presence of hands or gestures even in less clear images. This is because YOLOv8 focuses on detecting objects as a whole, using contour and spatial features that remain visible even at low pixel counts. At the same time, MediaPipe Hands did not lose its ability to identify key points of the hand – even at lower resolutions, the algorithm continued to correctly construct the skeleton of the hand and accurately calculate the position of the fingers. Thanks to this, MediaPipe maintained high accuracy during further calculations and gesture classification, as it relied not only on the shape of the object, but also on the relative coordinates of the anatomical points of the hand.

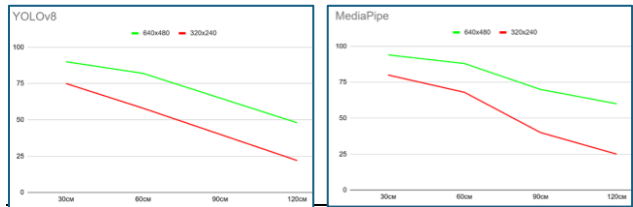


Fig. 13. Graphs showing the effect of input image resolution (480p and 240p) on gesture recognition accuracy under medium lighting conditions (approximately 500 lumens), left – YOLOv8 model, right – MediaPipe model

Fig. 13 shows that the YOLOv8 model performs significantly worse in recognising gestures under average lighting conditions at low resolution, while MediaPipe continues to demonstrate fairly stable results and maintains acceptable accuracy

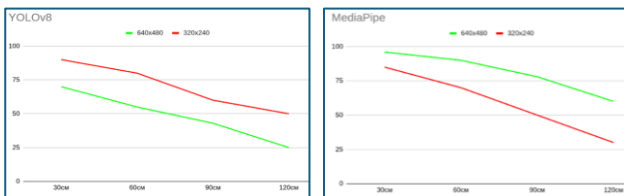


Fig. 10. Graphs showing the impact of input image resolution (480p and 240p) on gesture recognition accuracy under good lighting conditions (approximately 1200 lumens), left – YOLOv8 model, right – MediaPipe model

Based on the experimental data obtained, it can be concluded that both models – YOLOv8 and MediaPipe Hands – demonstrate a decrease in gesture recognition accuracy with an increase in distance to the camera and a decrease in resolution. At the same time, YOLOv8 shows higher stability at low resolution (320x240), maintaining relatively high accuracy values even at medium distances, which indicates the effectiveness of its object detector. However, at high resolution (640x480), MediaPipe significantly outperforms YOLOv8, providing recognition accuracy of over 90% at close and medium distances (up to 60 cm). This is because MediaPipe uses an anatomical model of the hand.

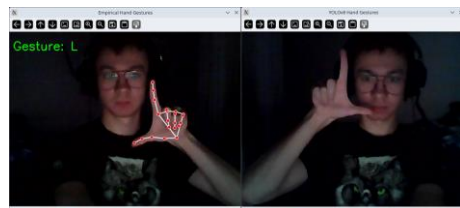


Fig. 14. Demonstration of the experiment conducted on gesture L recognition based on MediaPipe methods (left) and the YOLOv8 model (right) in low light conditions (approximately 100 lumens)

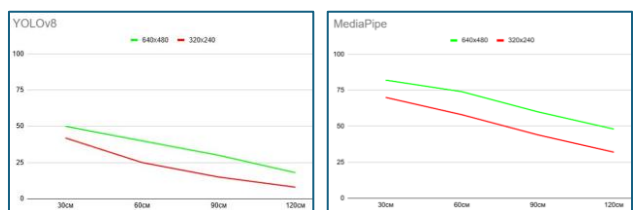


Fig. 15. Graphs showing the effect of lighting changes on gesture recognition accuracy, left – YOLOv8 model, right – MediaPipe model

At a lighting level of about 100 lumens, the accuracy of both methods decreases significantly. YOLOv8 loses

stability even at short distances and almost does not recognise gestures at a distance of 90-120 cm, especially at a resolution of 240p. MediaPipe, on the other hand, although it shows a drop in accuracy, still maintains an acceptable level of recognition at short and medium distances, which indicates its better stability in low light conditions. Thus, we can conclude that the MediaPipe model is better suited to changing shooting conditions and is a more versatile tool for recognition in complex visual environments.

The next stage of the study was to compare the accuracy of MediaPipe and YOLOv8 models in affine transformations. In this experiment, the hands were positioned at different angles relative to the camera – both frontally and at an angle, partially covering the fingers or extending beyond the frame.

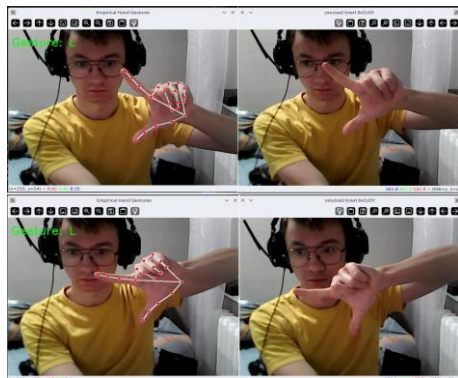


Fig. 16. MediaPipe model (left) and YOLOv8 model (right) at different hand tilt angles

Fig. 16 shows that the MediaPipe model demonstrates stable results thanks to the use of a method based not only on visual detection of the hand, but also on calculations of distances and angles between key points. This approach allows for the analysis of spatial relationships between the fingers and the palm, ensuring high accuracy when lighting changes or the hand is partially obscured. However, it should be noted that MediaPipe performs worse with strong hand tilts, as its algorithm is empirical in nature – the angles and distances between points depend on the projection of the hand onto the image plane. Because of this, when the tilt angle changes significantly, the calculated parameters also change, which can lead to incorrect gesture recognition. At the same time, even at angles of 45 and 90°, MediaPipe still retains the ability to consistently track key points and correctly recognise gestures. In contrast, YOLOv8 demonstrates lower overall accuracy, likely due to insufficient model training or a limited number of variations in the training sample. If the model observed only a narrow set of hand positions during training, it generalises new situations less well – different angles,

lighting or partial overlap. This is especially noticeable at angles of 45° and even more so at 90°, where YOLOv8 quite often fails to recognise the gesture at all, highlighting its sensitivity to affine transformations and the lack of variability in the training data. The experiment showed that MediaPipe demonstrates better results in almost all conditions – it consistently determines the position of the hand even in average or poor lighting. However, its accuracy may decrease with significant hand tilts or partial finger overlap, when it is difficult for the algorithm to correctly construct a spatial model. In turn, YOLOv8 is better suited for rapid classification of visual images, so it is advisable to combine the advantages of both methods. The optimal solution may be a hybrid system in which MediaPipe is used to highlight the hand and determine key points, and YOLOv8 or another classifier is used to analyse these points and finally recognise the gesture. This approach will improve the accuracy and stability of the recognition system in real-world conditions.

Conclusions

The study resulted in a comparative analysis of two models for hand gesture recognition – MediaPipe Hands and YOLOv8 – taking into account the influence of external factors such as lighting, resolution, and spatial position of the hand. The resulting graphs of the experiments show that the MediaPipe model provides higher stability and accuracy under various conditions due to the use of an anatomical hand model, while YOLOv8 demonstrates better resistance to low resolution but significantly loses accuracy in difficult lighting conditions and affine transformations. Analysis of the impact of external conditions confirmed that the quality of gesture recognition is determined by the availability of visual information: poor or overly bright lighting, low video signal quality, and a strong tilt of the hand reduce the accuracy of both models, but MediaPipe responds to such changes more confidently and predictably. The YOLOv8 model, on the other hand, showed a high dependence on the diversity of training data, which limits its performance in cases of non-standard gestures or when the system is used by people with motor impairments.

The software prototype confirmed that no single approach is universal, and the best results can be achieved by combining the strengths of both models. The optimal solution is a hybrid system in which MediaPipe Hands are used to accurately determine key points of the hand, and a neural network classifier is used to interpret gestures. This opens opportunities for the creation of adaptive assistive systems that can work in real-world conditions, supporting gesture sequence recognition, and increasing the level of autonomy and accessibility for people with disabilities.

REFERENCES

1. Barkovska, O., Shapiro, A., Mavrynskyi, O., & Zhebin, P. (2025). Research on the sensitivity of the distance measurement method based on the facemesh algorithm. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 2(80), 76-82. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.2.076>
2. J. Shin, A. S. M. Miah, M. H. Kabir, M. A. Rahim and A. Al Shiam, "A Methodological and Structural Review of Hand Gesture Recognition Across Diverse Data Modalities," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 142606-142639, 2024, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3456436>.
3. Zhang, T.; Wang, Y.; Zhou, X.; Liu, D.; Ji, J.; Feng, J. Intelligent Human-Computer Interaction for Building Information Models Using Gesture Recognition. *Inventions* 2025, 10, 5. <https://doi.org/10.3390/inventions10010005>.

4. Al Farid, F.; Hashim, N.; Abdullah, J.; Bhuiyan, M.R.; Shahida Mohd Isa, W.N.; Uddin, J.; Haque, M.A.; Husen, M.N. A Structured and Methodological Review on Vision-Based Hand Gesture Recognition System. *Journal of Imaging* 2022, 8, 153. <https://doi.org/10.3390/jimaging8060153>.
5. Marques, P.; Váz, P.; Silva, J.; Martins, P.; Abbasi, M. Real-Time Gesture-Based Hand Landmark Detection for Optimised Mobile Photo Capture and Synchronisation. *Electronics* 2025, 14, 704. <https://doi.org/10.3390/electronics14040704>.
6. Barkovska, O., Ruban, I., Tymoshenko, D., Holovchenko, O., & Yankovskyi, O. (2025). Research on mobile machine learning platforms for human gesture recognition in human-machine interaction systems. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(2)(82), 6–14. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.325423>
7. M. Al-Hammadi et al., "Deep Learning-Based Approach for Sign Language Gesture Recognition With Efficient Hand Gesture Representation," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 192527-192542, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032140>.
8. Li, H.-H., & Hsieh, C.-C. (2025). Dynamic Hand Gesture Recognition Using MediaPipe and Transformer. *Engineering Proceedings*, 108(1), 22. <https://doi.org/10.3390/engproc2025108022>
9. Sun, Y., Zhang, Y., Wang, H. et al. SES-YOLOv8n: automatic driving object detection algorithm based on improved YOLOv8. *SIVIP* 18, 3983–3992 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11760-024-03003-9>
10. R. Varghese and S. M., "YOLOv8: A Novel Object Detection Algorithm with Enhanced Performance and Robustness," *2024 International Conference on Advances in Data Engineering and Intelligent Computing Systems (ADICS)*, Chennai, India, 2024, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/ADICS58448.2024.10533619>

Received (Надійшла) 18.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Яровий Валерій Вікторович – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Valerii Yarovy – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: valerii.iarovy@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0008-3631-8586>.

Барковська Оlesia Юрійвна – доцент кафедри електронних обчислювальних машин, кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Olesia Barkovska – Associate Professor, Department of Electronic Computers, Candidate of Technical Sciences, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: olesia.barkovska@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-7496-4353>.

Максимов Дмитро Максимович – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Dmytro Maksymov – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine; e-mail: dmytro.maksymov2@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0002-5206-3233>.

Ні Яна Самвелівна – доцент кафедри електронних обчислювальних машин, кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Yana Ni – Associate Professor, Department of Electronic Computers, Candidate of Technical Sciences, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: yana.movsesian@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-1352-700X>.

Раптанов Данііл Андрійович – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Daniil Raptanov – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: daniil.raptanov@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0001-9564-0080>.

Методи розпізнавання жестів рук із використанням комп'ютерного зору для допомоги людям з порушеннями руху або мовлення

В. В. Яровий, О. Ю. Барковська, Д. М. Максимов, Я. С. Ні, Д. А. Раптанов

Анотація. Актуальність. Системи розпізнавання жестів рук у реальному часі відіграють важливу роль у розвитку сучасних технологій взаємодії людини з «розумним середовищем». Вони створюють умови для безконтактного керування пристроями та відкривають нові можливості комунікації для людей з порушеннями мовлення або руховими порушеннями. **Об'єктом дослідження** є система розпізнавання жестів рук у реальному часі з використанням методів комп'ютерного зору та машинного навчання. **Метою статті** є дослідження та порівняння різних методів розпізнавання жестів рук у реальному часі з використанням комп'ютерного зору та машинного навчання. Зокрема, у дослідженні оцінюється ефективність MediaPipe Hands та YOLOv8 для виявлення та класифікації жестів рук. Мета полягає у визначенні, який підхід забезпечує вищу точність та кращу адаптивність для таких застосувань, як допоміжна комунікація для людей з порушеннями мовлення або моторики. **Результати досліджень.** У процесі роботи розроблено прототип системи, що поєднує технології відеообробки (GStreamer або FFmpeg), бібліотеку MediaPipe Hands для визначення ключових точок руки, та моделі глибинного навчання типу CNN або LSTM для класифікації жестів і послідовностей рухів. Отримані результати засвідчили можливість точного розпізнавання жестів у реальному часі, а також гнучку адаптацію до індивідуальних особливостей користувача. **Висновки.** Інтерпретація результатів показала, що ефективність системи пояснюється використанням комплексного підходу: поєднання детекції 3D-координат ключових точок руки з нейронною мережею дозволило досягти високої стабільності навіть за змінних умов освітлення чи фону. Розроблена технологія може бути застосована в асистивних системах комунікації для людей з інвалідністю, у медичних та реабілітаційних закладах, а також для управління елементами «розумного будинку». Її впровадження сприяє підвищенню рівня доступності цифрових технологій і покращенню якості життя користувачів.

Ключові слова: жест, розпізнавання, комп'ютерний зір, MediaPipe Hands, нейронні мережі, асистивні технології.

Я. І. Бірук

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

ЗАХОДИ НОРМАЛІЗАЦІЇ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ СЕРЕДОВИЩА БУДІВЕЛЬ І СПОРУД У ПРОЦЕСАХ ЇХ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТА ВІДНОВЛЕННЯ

Анотація. Будівлі і споруди промислового, громадського та житлового призначення з великими термінами експлуатації не відповідають сучасним вимогам щодо енергоефективності, рівнів фізичних факторів техногенного походження. Тому у процесах їх реконструкції та відновлення необхідно забезпечити нормалізацію цих параметрів у відповідності з вимогами чинних нормативних документів. Досліджено витоки теплової енергії у спорудах старої забудови. Запропоновано застосування композиційних матеріалів на основі базальту для підвищення термоізоляції. Такий матеріал має малі масогабаритні параметри, простий у застосуванні і не спотворює зовнішній вигляд будівлі, що важливо для споруд, які мають історичну цінність. Отримано кількісні дані щодо звукопоглинальних властивостей композиту. Встановлено, що на середніх та високих частотах він має високі коефіцієнти звукопоглинання. Надано зручний у користуванні математичний апарат для прогнозування термічного опору термоізолюючих матеріалів та коефіцієнтів звукопоглинання. Це дозволяє мінімізувати кількість параметрів, які необхідно визначити у лабораторних умовах. Усі розрахунки виконуються у дійсній формі, що спрощує процеси обчислень та надає можливість автоматизувати процес проєктування матеріалів і захисних конструкцій. Визначено порядок забезпечення електромагнітної безпеки у будівлях в процесі реконструкції. Оцінюються коефіцієнти екранування електромагнітних випромінювань стандартними будівельними і облицювальними матеріалами та визначаються додаткові заходи безпеки. Додавання у облицювальні матеріали дрібнодисперсного магнетиту та карбонільного заліза підвищує їх екранувальні властивості. Досліджено ступені деіонізації повітря у стандартних системах примусової вентиляції. Показано значну деіонізацію повітря, яке подається у приміщення. Для нормалізації концентрації іонів обох полярностей запропоновано застосування світлодіодних систем ультрафіолетового випромінювання та отримані кількісні дані. Виміряні концентрації радону, який накопичується у підвальних та напівпідвальних приміщеннях будівель старої забудови. Показано, що прийняте зниження концентрацій радону можна досягти застосуванням гідроізоляції із сучасних цементобетонів.

Ключові слова: реконструкція, енергоефективність, електромагнітні випромінювання, звукоізоляція.

Вступ

Значна частина будівель і споруд як в Україні, так і в усьому світі потребує реконструкції через великі терміни експлуатації та невідповідність сучасним будівельним та екологічним нормам. Особливо це актуально в Україні через ушкодження великої кількості будівель внаслідок бойових дій та терористичних атак. При цьому частина таких будівель є об'єктами історичної спадщини й потребують відновлення без змін зовнішнього вигляду та внутрішніх інтер'єрів.

Усі будівлі й споруди старої забудови споруджувалися за іншими будівельними нормами або взагалі за їх відсутності. У ті часи не ставилося вимог до мікрокліматичних параметрів середовища, рівні шуму були незначні, а електромагнітні чинники техногенного походження відсутні. Через відсутність даних щодо рівнів іонізуючих випромінювань, зокрема наявності радону, його проникнення у приміщення не враховувалося. В той же час існуючі системи вентиляції та недостатньо ефективна гідроізоляція сприяє підвищенню радіоактивного фону в підвальних, напівпідвальних приміщеннях, нижніх поверхах будівель. При цьому порушується мікрокліматичний режим, змінюється концентрація аероіонів тощо. Таким чином, існує проблема забезпечення сучасних нормативних вимог щодо кількісних значень мікроклімату, шуму, неіонізуючих та іонізуючих випромінювань у будівлях і спорудах з великими

термінами експлуатації. Вирішити ці задачі можливо впровадженням інноваційних засобів нормалізації фізичних чинників середовища у процесах реконструкції та відновлення будівель і споруд.

Стан питання

Рівні фізичних чинників середовища будівель – температура й відносна вологість повітря, рівні шуму й електромагнітних полів, концентрації аероіонів та радіоактивних ізотопів регламентуються низкою міжнародних та національних стандартів та санітарних норм. Враховуючи, що значна частина будівель віднесена ЮНЕСКО до об'єктів всесвітньої спадщини й цей процес продовжується, а також перспективи розвитку України, доцільно керуватися міжнародними нормативними актами, принаймні, за їх більш жорстких вимог. Щодо значень електромагнітних полів то це Європейська директива [1], шуму – [2]. Температурний режим, концентрації аероіонів та радіоактивний фон найбільш аргументовано регламентується у санітарних нормах Німеччини [3]. Цей норматив найбільш досконалий й більшістю фахівців у Європі за замовчуванням вважається міжнародним.

На сьогодні більшість досліджень щодо будівель з великими термінами експлуатації, особливо історичних, стосуються мікрокліматичних умов [4, 5]. Значною мірою це обумовлене тим, що мікрокліматичні параметри можна поліпшити за рахунок модернізації системи вентиляції, зокрема знизити відносну вологість повітря й підвищити температуру поданням

у приміщення теплого повітря. Але це не вирішує задач, пов'язаних з деіонізацією повітря, а частково – потраплянням у повітря радону. Крім того, існує обмеження на спрямований рух повітря за великих кратностей повітрообміну. Проблемою є забезпечення якості повітря у приміщеннях, де зберігаються матеріали та історичні цінності [6]. Існують певні розбіжності щодо параметрів середовища для зберігання культурних цінностей та перебування персоналу. Тому доцільно розглянути можливість узгодження відповідних вимог за рахунок інноваційних рішень. У роботах [7, 8] фактично констатується факт наявності радонової проблеми і її зв'язок з геологічними факторами. Задача полягає у тому, щоб запобігти розповсюдженню радону у повітрі будівель і споруд. Найбільш складним завданням є підвищення звукоізоляції будівель, не розрахованих на високі рівні зовнішнього шуму. У дослідженні [9] наведено можливість зниження широкосмугового шуму за рахунок комбінації резонансних панелей та шумопоглинальних матеріалів. При цьому показана можливість одночасного зниження рівнів електромагнітних випромінювань. Але така конструкція досить громіздка. Її застосування доцільне тільки для первинного будівництва. Робота [10] розглядає можливість оптимізації параметрів звукопоглинального матеріалу. Цей підхід є справедливим й може бути застосований для мінімізації товщини захисного шару, що особливо актуально для будівель історичної спадщини. В останні роки проведено низку досліджень й практичних розробок щодо отримання композиційних матеріалів, які екранують електромагнітні поля і випромінювання [11, 12]. Основним недоліком окремих матеріалів є висока ефективність у певному частотному діапазоні. До того ж композити на полімерній основі мають схильність до деградації у процесі експлуатації у під впливом фізико-хімічних чинників. Але можливість отримання захисного матеріалу малої товщини й технологічності у застосуванні є перспективною. Доцільно дослідити застосування будівельних і облицювальних матеріалів з функціями захисту від електромагнітних впливів. Відомо, що будівлі з великими термінами експлуатації мають низьку енергоефективність [13]. Теплоізолюючі матеріали масового виробництва мають велику товщину й складно наносяться на поверхні великої кривизни. Тому необхідно визначити можливість підвищення теплоізоляційних властивостей стін будівель з великими термінами експлуатації без значних змін конструкцій та зовнішнього вигляду.

Метою дослідження є розроблення комплексу заходів з нормалізації фізичних чинників середовища будівель з великими термінами експлуатації у процесі їх реконструкції та відновлення.

Викладення основного матеріалу

Найбільш ефективними є заходи, розроблені на основі моніторингу фактичних значень того чи іншого фізичного чинника. Такий моніторинг можливий на стадії проектування реконструкції будівлі. Він надає орієнтовні необхідні ефективності захисту від техногенних чинників та мінімізувати витрати на впровадження відповідних заходів.

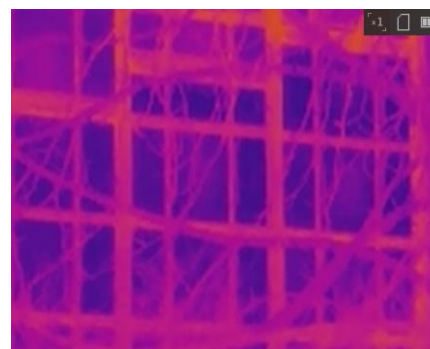
Для будівель, які потребують відновлення або певної реконструкції здійснення такого моніторингу неможливе. Тому фактичний матеріал доцільно отримати за рахунок обстеження аналогічних або подібних будівель. Історичні будівлі споруджувалися за індивідуальними проектами, тому необхідні дані можливо отримати тільки опосередкованим шляхом – з'ясуванням тепловідносності використаних будівельних матеріалів, вимірюванням радіоактивного фону у підвальних приміщеннях, з'ясування ефективності вентиляції за перерізами вентиляційних каналів тощо.

Планування заходів забезпечення нормативних параметрів мікроклімату доцільно здійснювати на комплексній основі разом із заходами з нормалізації концентрації аероіонів у повітрі приміщень. Оптимізувати їх співвідношення архітектурно будівельними рішеннями не завжди можливо, тому необхідно мати експериментальні дані щодо штучного підтримання необхідних факторів з використанням відповідного обладнання.

Найбільш вагомим, і таким що найбільш відчувається людиною фізичним фактором є температурний режим приміщень. На сьогодні підтримання нормативних температур сучасними системами опалення не є проблемою. Але з огляду на економічний чинник у процесі реконструкції та відновлення необхідно забезпечити високу енергоефективність будівель. Це у першу чергу стосується будівель, споруджених за застарілими технологіями та виробничих будівель і споруд з великими площами зовнішніх стін. Дослідження показали, що навіть за великих товщин стін, вони не мають достатньої теплоізоляції (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Стіни будівлі, яка підлягає додатковій теплоізоляції (а); тепловізійне зображення аналогічної будівлі, у якій працює опалення (б)

На рис. 1 б тепловізійна зйомка свідчить, що стіни будівлі сильно прогріваються і утримують тепло гірше, ніж новітні віконні системи. При цьому температура всередині будівлі не перевищувала $+16^{\circ}\text{C}$, а назовні не була нижчою за -5°C . Аналогічна ситуація спостерігається у застарілих промислових будівлях, виготовлених із залізобетонних конструкцій. Теоретичні міркування свідчать, що скловолокно і базальтне волокно добре блокує теплове випромінювання навіть за променевого теплообміну, що не тільки може зберегти тепло всередині будівлі, а й стабілізувати тепловий режим у теплу пору року. Стандартні теплоізоляційні плити мають товщини 50–100 мм, що для відновлювальних робіт не завжди прийнятно.

Було випробувано теплоізоляційне покриття двошарової структури на основі базальтового волокна поверхневою густиною $0,2 \text{ кг/м}^2$, скріплених полімерним в'язучим. Загальна товщина складала 2,5 мм (табл. 1).

Таким чином, враховуючи малу товщину термоізолюючого матеріалу, результат можна вважати задовільним. В умовах експерименту усі параметри – внутрішня температура будівлі, температура зовнішнього повітря, змінювалися у межах $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$. Реальні температури визначалися за допомогою тепловізора OTS-XLT з похибкою вимірювання 2 К.

Таблиця 2 – Коефіцієнти звукоізоляції композиційного матеріалу на основі базальтових волокон

f , Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000
α	0,05	0,08	0,18	0,35	0,60	0,73	0,80

Як термоізоляцію, так й зниження рівнів шуму доцільно попередньо прогнозувати розрахунковими методами у залежності від умов використання захисних матеріалів і конструкцій.

Для проектування термоізоляції будівлі необхідно попередньо оцінити її необхідну і достатню ефективність. Це можливо зробити розрахунковими методами, виходячи з фундаментальних співвідношень теплопередачі та теплофізичних характеристик будівельних, облицювальних та термоізолюючих матеріалів.

Оцінимо температуру зовнішньої поверхні стіни будівлі і тепловтрати через стіну, яка покрита шаром теплоізолюючого матеріалу. Впливом сонячного випромінювання будемо нехтувати.

Щільність теплового потоку крізь стіну може бути розрахована відповідно до закону охолодження Ньютона:

$$q = U(t_i - t_e), \quad (1)$$

де t_i і t_e – температури повітря зовні і всередині приміщення, U – теплопроникність стіни – величина, обернена до її повного теплового опору R_t :

$$U = \frac{1}{R_t}. \quad (2)$$

Для оцінки R_t необхідно врахувати, що теплообмін між внутрішнім і зовнішнім повітрям відбувається через випромінювання, конвекцію і тепло-

Таблиця 1 – Залежність температури зовнішнього боку теплоізолюючого покриття від часу теплопереносу*

T , год	t_e , $^{\circ}\text{C}$	t_s , $^{\circ}\text{C}$
6	14	10
12	11	4
24	8	1

* T – час теплопереносу, t_e – температура зовнішньої поверхні стіни, вкритої термозахисним матеріалом, t_s – температура зовнішньої поверхні термоізолюючого матеріалу

Як зазначалося, заходи з нормалізації рівнів фізичних факторів доцільно здійснювати на комплексній основі, у тому числі, використовуючи один матеріал для одночасного зниження впливу двох фізичних факторів.

Було проведено випробування шумопоглинаючих властивостей базальтової композиції у октавних смугах частот (табл. 2)/

Як видно з табл. 2, коефіцієнти звукоізоляції у низькочастотній області звукового спектра незначні. Це очікувано через відомий факт неефективності пористих матеріалів для поглинання низькочастотних коливань. Але в області середніх та високих частот результат задовільний.

провідність. Теплота переноситься від внутрішньої поверхні стіни до зовнішньої поверхні теплоізолюючого шару – завдяки теплопровідності, від зовнішньої поверхні теплоізолюючого шару в зовнішнє повітря – завдяки випромінюванню і конвекції. В результаті повний тепловий опір складається з теплових опорів внутрішньої і зовнішньої поверхонь стіни $-R_{si}$ і R_{se} відповідно і теплових опорів матеріалів стіни – R_l і теплоізолятора R_2 :

$$R_t = R_{si} + R_l + R_2 + R_{se}, \quad (3)$$

причому,

$$\frac{1}{R_{si}} = \frac{1}{R_{ci}} + \frac{1}{R_{ri}}, \quad \frac{1}{R_{se}} = \frac{1}{R_{ce}} + \frac{1}{R_{re}}, \quad (4)$$

де R_{ci} і R_{ce} – теплові опори, пов'язані з конвекцією, R_{ri} і R_{re} – теплові опори, пов'язані з випромінюванням. Враховано, що за електричною аналогією в електричній схемі заміщення опори, обумовлені конвекцією і випромінюванням, з'єднуються паралельно. Величини R_{si} і R_{se} повинні залежати від випромінювальної здатності поверхонь, виду конвекції, швидкості і напрямку вітру. Для їх оцінки можна використати типові числові значення для більшості прикладних задач, які наведені в ISO 6946:2017.

Величини опорів R_l і R_2 , відповідно до закону Фур'є для теплопровідності, можуть бути розраховані за формулами:

$$R_1 = \frac{d_1}{\lambda_1}, \quad R_2 = \frac{d_2}{\lambda_2}, \quad (5)$$

де d_1 і d_2 – товщини стіни і теплоізолятора, λ_1 і λ_2 – теплопровідності відповідних матеріалів.

Температура зовнішньої поверхні теплоізолюючого шару t_{se} відрізняється від температури зовнішнього повітря. Щільність теплового потоку в шарі повітря зовні, яка в даному наближенні дорівнює тепловтратам стіни, може бути визначена за формулою аналогічною (1):

$$q = \frac{t_{se} - t_e}{R_{se}}, \quad (6)$$

$$\text{звідки} \quad t_{se} = t_e + R_{se}q. \quad (7)$$

Після підстановки в (7) значення q із (1), з урахуванням (2), для температури зовнішньої поверхні теплоізолюваної стіни будівлі отримуємо:

$$t_{se} = t_e + R_{se} \frac{1}{R_t} (t_i - t_e). \quad (8)$$

Таким чином, оцінка тепловтрат може бути проведена на основі (6) за виміряним значенням температури зовнішньої поверхні стіни і відомим значенням температури атмосферного чи зовнішнього повітря. Оцінка температури зовнішньої поверхні стіни може бути виконана з використанням (8) за відомими значеннями зовнішньої і внутрішньої температур, товщин і теплопровідностей матеріалів стіни і теплоізолятора. Для величин теплових опорів зовнішньої і внутрішньої поверхонь стіни, які необхідні для розрахунків, можуть бути використані типові значення відповідно до ISO 6946:2017. Наприклад, у випадку горизонтального теплового потоку $R_{se} = 0,04 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$, $R_{si} = 0,13 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$.

Для прогнозування ефективності звукоізоляції можливо скористатися моделлю Delany-Bazley, яку було вдосконалено з метою спрощення практичного використання. Усі розрахунки здійснюються у дійсній формі, що надає можливість автоматизувати процес обчислень. Коефіцієнт звукопоглинання α визначається зі співвідношення:

$$\alpha = \frac{4\rho_0 c_0 (\cosh(\varepsilon) - \cos(\theta)) (\beta \sinh(\varepsilon) - \gamma \sin(\theta))}{\left(\beta \sin(\theta) + \gamma \sinh(\varepsilon) \right)^2 + \left(\rho_0 c_0 (\cosh(\varepsilon) - \cos(\theta)) \right)^2}, \quad (9)$$

$$\text{де} \quad \beta = \rho_0 c_0 \left(1 + 0,0571 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0,754} \right), \quad (10)$$

$$\gamma = 0,087 \rho_0 c_0 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0,732}, \quad (11)$$

$$\varepsilon = 0,756 \frac{\pi f d}{c_0} \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0,595}, \quad (12)$$

$$\theta = \frac{4\pi f d}{c_0} \left(1 + 0,0978 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0,700} \right), \quad (13)$$

де d – товщина пористого шару, ρ_0 – густина повітря, c_0 – швидкість звуку у повітрі, f – частота звуку, σ – опір продуванню.

Таким чином, єдиним параметром звукоізолюючого матеріалу, який необхідно визначати у лабораторних умовах, є опір продуванню, що здійснюється у стандартній імпедансній трубі.

Для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону доцільно максимально використовувати захисні функції будівельних та облицювальних матеріалів. Засади проектування та визначення захисних властивостей таких матеріалів викладено у попередній роботі [14].

Головною умовою забезпечення раціональних коефіцієнтів екранування як низькочастотних магнітних полів, так і високочастотних електромагнітних випромінювань. Маючи інформацію щодо амплітудно-частотних характеристик зовнішніх електромагнітних полів за кроком розташування арматури або армуючої сітки можна розрахувати коефіцієнти екранування полів. У разі необхідності підвищення екранування у облицювальні матеріали додають магнетит, карбонільне залізо у залежності від необхідної ефективності екранування. При цьому слід враховувати необхідність достатніх рівнів сигналів базових станцій для забезпечення надійного мобільного зв'язку.

У процесах реконструкції та відновлення промислових та житлових будівель слід враховувати зміни концентрації іонів в каналах вентиляції. У першу чергу це стосується промислових та громадських будівель, де монтуються системи примусової вентиляції з каналами оцинкованого заліза. Вимірювання свідчать, що у процесі переносу повітря такими каналами знижується концентрація іонів обох полярностей (табл. 3).

Таблиця 3 – Зміни концентрації іонів

Місце вимірювання	Концентрації іонів, см^{-3}	
	n^-	n^+
Вхід у повітропровід	650–740	850–920
Вихід у приміщення	220–250	380–410

Довжини повітропроводів склали 14–18 м, тому погонну деіонізацію повітря можна вважати суттєвою. Визначити типову погонну деіонізацію повітря для металевих коробів складно через те, що вона залежить від конфігурації повітропроводу та на шарування пилу на стінках. Таке явище слід враховувати щодо вентиляційних каналів у будівлях з великими термінами експлуатації й передбачити можливість їх очищення.

У разі потреби доцільно застосовувати сучасні світлодіодні системи ультрафіолетового випромінювання для іонізації повітря приміщень. Єдиною умовою їх застосування є розміщення на відстанях не менше 2 м від людей. Рівні іонізації повітря із застосування таких систем у приміщенні об'ємом 80 м^3 , наведено у табл. 4.

Таблиця 4 – Рівні іонізації повітря у приміщенні об'ємом 80 м³

	Концентрації іонів, см ⁻³	
	n ⁻	n ⁺
Фонові значення	300–380	530–640
З іонізатором	540–560	810–900

Наведені показники є усередненими. Ступені іонізації повітря залежать від відносної вологості повітря, концентрацій завислих частинок (дрібнодисперсного пилу), швидкості спрямованого руху повітря. За необхідності одночасного підвищення й відносної вологості повітря у приміщеннях доцільно застосовувати ультразвукові іонізатори. У таких пристроях іонізація здійснюється за рахунок балоелектричного ефекту подрібнення крапель води ультразвуком, що супроводжується частковим розпиленням води у повітрі. Недоліком таких пристроїв є обмежений об'єм обслуговування. Тому у процесі виконання проектних робіт необхідно оцінювати співвідношення об'ємів та ефективності іонізаторів повітря.

У більшості будівель і споруд з великими термінами експлуатації виникають проблеми з гідроізоляцією. Крім підвищення вологості повітря це сприяє проникненню у підвальні, напівпідвальні приміщення та на нижні поверхи радону. Вимірювання свідчать, що цей показник може складати 110–260 Бк/м³, що перевищує гранично допустимий рівень 100 Бк/м³ (Directive 2013/59 Euratom). Припинення проникнення радону до приміщень дуже складна задача, але вимірювання свідчать, що навіть ретельна гідроізоляція підвальних приміщень із застосуванням цементобетонних сумішей, що використовуються для басейнів знижує цей показник до 40–60 Бк/м³.

Усі проектні роботи щодо визначення необхідності нормалізації фізичних факторів у будівлях і спорудах у процесі їх реконструкції та відновлення доцільно здійснювати на пріоритетній основі. Визначається найбільш вагомий фактор, який потребує нормалізацію у першу чергу. Наступним кроком є визначення менш вагомий фактора тощо.

Як зазначалося, можна одним матеріалом знижувати теплові втрати й рівні шуму. У залежності від результатів моніторингу у першу чергу надають більшу ефективність матеріалу щодо того фактора, який більш вагомий з точки зору якості середовища перебування людей. У [14] показана принципова можливість одночасної нормалізації рівнів електромагнітних полів та теплових втрат. Створення прийнят-

них за ефективністю та вартістю універсальних матеріалів для зниження рівнів фізичних факторів техногенного походження сприятиме зниженню масогабаритних параметрів облицювань та є перспективним напрямом досліджень й прикладних розробок.

Висновки

1. Будівлі і споруди з великими термінами експлуатації не відповідають сучасним нормативам щодо енергоефективності та рівнів фізичних факторів техногенного походження. Тому у процесі їх реконструкції та відновленні доцільно розробити й впровадити відповідний комплекс організаційно-технічних заходів.

2. Показано, що для будівель, особливо історичних необхідно застосовувати облицювальні матеріали малих товщин та питомої ваги. Досліджено ефективність композиційного термоізолюючого і звукопоглинального матеріалу на основі базальтового волокна. Встановлено, що матеріал завтовшки 2,5 мм значно підвищує теплоізоляційні властивості стін та має коефіцієнти звукопоглинання на середніх та високих частотах 0,6–0,8. Надано розрахунковий апарат щодо проектування теплоізолюючих та звукопоглинальних матеріалів потрібної ефективності з мінімальною кількістю параметрів, які необхідно визначити у лабораторних умовах.

3. Визначено порядок забезпечення електромагнітної безпеки працюючих та населення за рахунок застосування стандартних та композиційних будівельних і облицювальних матеріалів. Додавання до облицювальних матеріалів магнетиту та карбонільного заліза без істотних змін пружних модулів дозволяє нормалізувати рівні електромагнітних випромінювань ультрависоких частот.

4. Розроблено засади нормалізації концентрацій іонів у приміщеннях. Встановлено, що у стандартних системах природної вентиляції відбувається значна деіонізація повітря. Тому у таких випадках доцільно використовувати штучну іонізацію повітря із застосуванням світлодіодних систем ультрафіолетового випромінювання. Їх перевагою є можливість застосування у присутності людей. Експериментально визначено проникнення у будівлі старої забудови радону. Показано, що для зниження його концентрацій у підвальних та напівпідвальних приміщеннях достатньо застосовувати гідроізоляцію із сучасних цементо-бетонних сумішей.

Використання засобів штучного інтелекту. Автор підтверджує, що не використовувала технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj>
2. Directive 2003/10/EC – noise. Of 6 February 2003 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (noise) (Seventeenth individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC). European Agency for Safety and Health at Work. Latest update: 19/03/2021. URL: <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/82>

3. Standard of Building Biology Testing Methods. SBM-2015/ Building biology evaluation guidelines for sleeping areas. Baubiologie Maes. Institut für Baubiologie + Nachhaltigkeit IBN. GUIDELINES. 4 p. URL: <https://buildingbiology.com/building-biology-standard/>
4. Rieser, A., Pfluger, R., Troi, A., Herrera-Avellanosa, D., Thomsen, K. E., Rose, J., Arsan, Z. D., Akkurt, G. G., Kopeinig, G., Guyot, G., & Chung, D. (2021). Integration of Energy-Efficient Ventilation Systems in Historic Buildings—Review and Proposal of a Systematic Intervention Approach. *Sustainability*, 13(4), 2325. <https://doi.org/10.3390/su13042325>
5. Laurini, E., De Vita, M., & De Berardinis, P. (2021). Monitoring the Indoor Air Quality: A Case Study of Passive Cooling from Historical Hypogeal Rooms. *Energies*, 14(9), 2513. <https://doi.org/10.3390/en14092513>
6. Fermo, P., Comite, V. (2022). Indoor Air Quality in Heritage and Museum Buildings. In: D'Amico, S., Venuti, V. (eds) *Handbook of Cultural Heritage Analysis*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60016-7_34
7. Nunes, L. J. R., Curado, A., & Lopes, S. I. (2023). The Relationship between Radon and Geology: Sources, Transport and Indoor Accumulation. *Applied Sciences*, 13(13), 7460. <https://doi.org/10.3390/app13137460>
8. Portaro, M., Rocchetti, I., Tuccimei, P., Galli, G., Soligo, M., Ciotoli, G., Longoni, C., Vasquez, D., & Sola, F. (2024). Indoor Radon Surveying and Mitigation in the Case-Study of Celleno Town (Central Italy) Located in a Medium Geogenic Radon Potential Area. *Atmosphere*, 15(4), 425. <https://doi.org/10.3390/atmos15040425>
9. Tkachenko, T., Burdeina, N., & Chencheva, O. (2023). Екранування електромагнітних полів та шуму у будівлях і спорудах. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 2(72), 186-189. <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.2.186>
10. N. Burdeina, V. Glyva, L. Levchenko, G. Krasnianskiy, Y. Biruk, S. Zozulya, L. Zozulya, M. Kashlev, T. Grzelakowski. (2025). Innovative Approaches to Designing Sound Insulation in Historic Buildings during Reconstruction. *International Journal of Conservation Science*, Volume 16, Special Issue. pp. 373-382, DOI: <https://doi.org/10.36868/IJCS.2025.si.01>
11. Glyva, V., Kasatkina, N., Burdeina, N., Levchenko, L., Khalmuradov, B., Khodakovskyy, O. Development and study of protective properties of the composite materials for shielding the electromagnetic fields of a wide frequency range. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, 2(12-104), pp. 40–47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.201330>
12. Glyva, V., Bakharev, V., Kasatkina, N., Levchenko, O., Levchenko, L., Burdeina, N., Guzii, S., Panova, O., Tykhenko, O., Biruk, Y. Design of liquid composite materials for shielding electromagnetic fields. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 3(6-111), pp. 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231479>
13. 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>
14. Burdeina, N., Levchenko, L., Korduba, I., Shamanskiy, S., Biruk, Y., Dovhanovskiy, 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>

Received (Надійшла) 22.10.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 14.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Бірук Яна Ігорівна – доктор філософії, доцент, доцент кафедри фізики, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна;

Yana Biruk – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;

e-mail: vesna0999@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-3669-9744>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57225188391>.

Principles of normalisation of physical environmental factors of buildings and structures in the process of their reconstruction and restoration

Yana Biruk

Abstract. Industrial, public and residential buildings and structures with long service lives do not meet modern requirements for energy efficiency and levels of physical factors of technogenic origin. Therefore, during their reconstruction and restoration, it is necessary to ensure the normalisation of these parameters in accordance with the requirements of current regulatory documents. The sources of heat energy loss in old buildings have been investigated. The use of basalt-based composite materials to improve thermal insulation has been proposed. Such material has low mass and dimensional parameters, is easy to use and does not distort the appearance of the building, which is important for structures of historical value. Quantitative data on the sound-absorbing properties of the composite have been obtained. It has been established that it has high sound absorption coefficients at medium and high frequencies. An easy-to-use mathematical tool for predicting the thermal resistance of thermal insulation materials and sound absorption coefficients has been provided. This minimises the number of parameters that need to be determined in laboratory conditions. All calculations are performed in real form, which simplifies the calculation processes and makes it possible to automate the design of materials and protective structures. The procedure for ensuring electromagnetic safety in buildings during reconstruction has been determined. The electromagnetic radiation shielding coefficients of standard building and facing materials are evaluated and additional safety measures are determined. The addition of finely dispersed magnetite and carbonyl iron to facing materials increases their shielding properties. The degrees of air deionisation in standard forced ventilation systems are investigated. Significant deionisation of the air supplied to the premises is shown. To normalise the concentration of ions of both polarities, the use of LED ultraviolet radiation systems is proposed and quantitative data are obtained. The concentrations of radon accumulating in the basements and semi-basements of old buildings were measured. It was shown that an acceptable reduction in radon concentrations can be achieved by using waterproofing made of modern cement concrete.

Keywords: reconstruction, energy efficiency, electromagnetic radiation, sound insulation.

В. А. Глива¹, Ю. І. Патерега², Т. В. Шабатура¹

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

² Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА СЕРЕДОВИЩЕ МЕТОДАМИ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ

Анотація. Досліджено можливості використання моделювання поширення електромагнітних полів різнорідних джерел для визначення електромагнітних навантажень на територіях у окремих будівлях та приміщеннях. Таке моделювання доцільно використовувати у разі неможливості визначення електромагнітної обстановки методом натурних вимірювань – на стадіях проектування та експертизи об'єктів, проектування розміщення електричного та електронного обладнання тощо. Передумовою коректного моделювання є визначення математичних функцій, які описують поширення електромагнітних полів різних частот та частотних діапазонів. Такі функції повинні мати припущення та спрощення, які забезпечують прийнятну похибку обчислень та бути зручними для створення прикладного програмного забезпечення. Вихідні дані для моделювання отримуються з технічної документації обладнання, яке генерує електромагнітні поля, та з результатів вимірювань параметрів полів однотипного обладнання, яке перебуває у експлуатації. За наявності діаграм спрямованості електромагнітних полів та поширення низькочастотного поля, у кожній точці з необхідним кроком розраховується значення напруженості електричної та магнітної складових електромагнітного поля або доцільності потоку енергії. Сума відношень квадратів напруженостей електричного та магнітного поля до квадратів відповідних гранично допустимих значень повинно перевищувати одиниці. Це відповідає чинним санітарним нормам. Відстані, до яких виконується розрахунок, визначаються у кожному конкретному випадку й повинні охоплювати усю територію або площу, для якої визначаються шукані показники.

Ключові слова: електромагнітне навантаження, моделювання, гранично допустимий рівень.

Вступ

Моделювання поширення електромагнітних полів на певній території, приміщенні тощо є надійним засобом прогнозування електромагнітного впливу на людей. Таке моделювання надає змогу раціоналізувати розміщення джерел електромагнітних полів на території житлової забудови, у будівлях та окремих приміщеннях з точки зору електромагнітної безпеки. Передумовою коректних результатів моделювання є наявність надійних даних щодо рівнів електромагнітних полів, що генерують усі критичні джерела та математичні співвідношення, що визначають закономірності поширення електромагнітних полів у просторі. Тому цим питанням приділено найбільша кількість досліджень. Але моделі зазвичай стосуються одного джерела або групи однотипних джерел й визначають зони гранично допустимих значень електричного, магнітного або електромагнітного поля. У реальних умовах присутні електромагнітні поля різних частот та частотних діапазонів. При цьому у багатьох випадках вони вимірюються у різних одиницях, що унеможливає їх застосування у одній моделі. Складність також полягає у різних значеннях гранично допустимих напруженостей полів або щільностей потоків енергії. У таких умовах не існує методики, складно прогнозувати електромагнітне навантаження на середовище, особливо на стадіях первинного будівництва, реконструкції та розміщення обладнання. Тому доцільно дослідити можливості застосування моделювання поширення електромагнітних полів різнорідних джерел з оцінюванням загального електромагнітного навантаження у кожній точці або зоні території або приміщення.

Огляд літературних джерел. Інтегральне електромагнітне навантаження на виробниче середовище й довкілля визначається зі співвідношень, наведених

у національних санітарних нормах для населення й працюючих [1, 2]. Особливістю цих документів є те, що для магнітних та електричних полів, для яких встановлені різні гранично допустимі рівні, у першому порівнюються фактичні значення й граничні, у другому – їх квадрати. Тому у практичній діяльності необхідно вказувати, яке співвідношення використовується у кожному конкретному випадку. Отримання розрахункових даних надасть можливість оцінити електромагнітне навантаження на середовище. Це здійснюється засобами моделювання. Поширення магнітних та електричних полів повітряних і кабельних ліній електропередачі наведено у [3, 4]. При цьому у першій роботі досліджено й зниження напруженості магнітного поля сітчастим магнітним екраном, а у другій – опліткою підземної кабельної лінії. Але лінійні джерела електромагнітного поля однієї частоти є найпростішим випадком. Поширення полів локалізованих у просторі джерел – трансформаторів, генераторів тощо є більш складним [5]. Це стосується як високочастотних електромагнітних полів, так і полів середніх та низьких частот [7]. Зазвичай моделювання здійснюється з використанням методу кінцевих елементів [8]. Головним джерелом похибок у процесі моделювання поширення електромагнітних полів є спрощення й припущення, закладені у розрахунковий апарат. У інженерній практиці для визначення поширення зовнішніх електромагнітних полів обладнання не потребує великої точності через наявність побічних полів, які важко врахувати. У роботах [9, 10] показано, що принаймні низькочастотне магнітне поле будь-якого джерела може бути представлене комбінацією магнітних диполів. Такий підхід реалізовано у дослідженні [11]. Верифікація результатів моделювання свідчить про прийнятну збіжність розрахункових та експериментальних даних.

Але усі наведені роботи стосуються одного або однотипних джерел електромагнітних полів. У реальних умовах територій або будівель присутні електромагнітні поля різних амплітудно-частотних характеристик, які неможливо урахувати в одній моделі. Тому доцільно дослідити можливість оцінювання електромагнітного навантаження на середовища, виходячи з порівняння гранично допустимих рівнів для кожного поля у будь-якій точці з даними моделювання й визначення загального електромагнітного навантаження.

Мета роботи – визначення електромагнітного навантаження на середовище за результатами моделювання поширення електромагнітних полів різнорідних джерел.

Викладення основного матеріалу

Електромагнітне навантаження на середовище визначається порівнянням електричної та магнітної складових електромагнітного поля (до 300 МГц) та щільностей потоків енергії (вище 300 МГц) з гранично допустимими значеннями для окремих частот та частотних діапазонів. Як зазначалося, у двох чинних санітарних нормах існують розбіжності щодо методики визначення. Враховуючи, що високочастотні поля визначаються за енергетичними показниками, для електромагнітних полів частотами, нижчими за 300 МГц доцільно порівнювати квадрати напруженостей поля, які пропорційні енергії поля [2].

$$\frac{E_1^2}{ГДР_1^2} + \frac{E_2^2}{ГДР_2^2} + \dots + \frac{E_n^2}{ГДР_n^2} + \frac{H_1^2}{ГДР_1^2} + \frac{H_2^2}{ГДР_2^2} + \dots + \frac{H_n^2}{ГДР_n^2} \leq 1,$$

де E і H – вимірні значення напруженості електричного і магнітного поля; $ГДР$ – гранично допустимі рівні відповідних частотних діапазонів.

Для високочастотних полів це:

$$\frac{W_1}{ГДР_1} + \frac{W_2}{ГДР_2} + \dots + \frac{W_n}{ГДР_n} \leq 1,$$

де W_n – вимірні значення щільності потоків енергії полів; $ГДР$ – гранично допустимі рівні відповідних частотних діапазонів.

На більшості територій та у окремих приміщеннях присутні електромагнітні поля різнорідних джерел, тому:

$$\frac{E_1^2}{ГДР_1^2} + \frac{E_2^2}{ГДР_2^2} + \dots + \frac{E_n^2}{ГДР_n^2} + \frac{H_1^2}{ГДР_1^2} + \frac{H_2^2}{ГДР_2^2} + \dots + \frac{H_n^2}{ГДР_n^2} + \frac{W_1}{ГДР_1} + \frac{W_2}{ГДР_2} + \dots + \frac{W_n}{ГДР_n} < 1,$$

Для визначення електромагнітного навантаження на середовище найбільш надійними способом є натурні вимірювання напруженостей електричної та магнітної складових електромагнітного поля та щільностей потоків енергії. Але така робота вимагає великих обсягів вимірювань, особливо якщо невідомі закономірності поширення електромагнітних полів

окремих джерел. А на стадіях проектування розміщення технічних засобів це неможливо. Тому доцільно створити моделі поширення полів різних джерел й обрати найбільш раціональний спосіб їх розміщення як з точки зору функціоналу, так і з міркувань електромагнітної безпеки.

Для здійснення моделювання необхідно визначитися з просторовими межами моделювання (відстані від джерел полів) та математичним функціями, які описують поширення електромагнітних джерел полів наднизьких, низьких та вищих частот.

Щодо площ, для яких здійснюється моделювання, то вони визначаються максимальними розмірами забудови або приміщення й відстанями до постійного перебування людей. Математичні функції, які описують закономірності поширення електромагнітних полів дуже різняться у залежності від частоти поля, характеру та функціоналу електричного та електронного обладнання. Для лінійних джерел електричних та магнітних полів промислової частоти (повітряних та кабельних ліній електропередачі) напруженості полів доцільно розраховувати за методикою, наведеною у [12, 13]. Для сегментів електричних струмів у окремих приміщеннях достатньо застосування простого співвідношення:

$$H = \frac{I}{4\pi r} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2),$$

де H – напруженість магнітного поля; I – електричний струм провіднику, r – відстань до точки визначення напруженості магнітного поля, φ_1, φ_2 – кути між сегментом лінійного струму та напрямком до кінців сегменту. За протікання електричних струмів периметром прямокутного приміщення:

$$H = \frac{I\sqrt{x^2 + y^2}}{\pi xy},$$

де x, y – довжина боків приміщення.

В усіх випадках береться діюче значення змінного струму промислової частоти. Точність таких розрахунків невелика, але прийнятна для оцінювання електромагнітної обстановки.

Структури магнітних та електричних полів промислової частоти локальних джерел більш складна. Це найпоширеніші електротехнічні пристрої – трансформатори, двигуни, генератори тощо. Магнітні поля трансформаторів мають дипольну форму, електродвигунів та генераторів – дипольно-квадрупольну, октапольну форму тощо. Зазвичай електрична складова електромагнітного поля наднизької частоти повністю екранується металевими корпусами та кожухами обладнання, тому доцільно розглядати магнітні складові електромагнітних полів.

Напруженість магнітного поля джерела дипольного типу визначаються співвідношенням:

$$H = \frac{m}{2\pi\mu_0 r_m^3},$$

де m – магнітний момент джерела, r_m – відстань до точки визначення напруженості магнітного поля, μ_0 – магнітна стала, ($\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м).

Магнітний момент можна визначити, виходячи зі значення робочого електроструму та площі контуру. Але точність такого визначення низька. Тому цей параметр доцільно визначити експериментально, вимірявши напруженість магнітного поля біля корпусу джерела:

$$m = 2\pi\mu_0 H r.$$

За r можна взяти будь-яку фіксовану відстань.

Для джерел магнітного поля більш складної форми доцільно застосовувати рівняння Гауса для скалярного потенціалу. Це надає змогу враховувати необхідну кількість просторових гармонік магнітного поля. Для дипольно-квадрупольного джерела поля радіальна компонентна у полярних координатах визначається окремо для дипольної ($n = 1$) та квадрупольної ($n = 2$) гармонік:

$$H_r^{(n=1)} = 2 \times (R_0/R)^3 \times (a_{10} \cos \theta + a_{11} \cos \varphi \sin \theta + b_{11} \sin \varphi \sin \theta).$$

$$H_r^{(n=2)} = \frac{3}{4\pi} (R_0/R)^4 \times \left[\frac{a_{20}}{2} (3 \cos^2 \theta - 1) + 3(a_{21} \cos \varphi + b_{21} \sin \varphi) \sin 2\theta + 12(a_{22} \cos 2\varphi + b_{22} \sin 2\varphi) \sin^2 \theta \right].$$

де R_0 – умовний радіус джерела у сферичному наближенні, a і b – амплітудні значення відповідних гармонік, θ , φ – кути сферичних координат, R – відстань до точки визначення напруженості магнітного поля. Підсумкове значення розраховується зі співвідношення:

$$H = (R_0/R)^3 \times a_{11} \times \cos \varphi \times \sin \theta + (R_0/R)^4 \times a_{22} \cos 2\varphi \times \sin^2 \theta.$$

де a_{11} , a_{22} – амплітудні значення дипольної та квадрупольної гармонік магнітного поля.

Цей параметр можна визначити експериментально. Наприклад, відомо [11], що біля корпусу чотиріполюсної електричної машини дипольна гармоніка складає 0,5 квадрупольної.

У будь-якому випадку для коректного здійснення моделювання поширення магнітного поля не-

обхідно провести вимірювання напруженості магнітного поля біля корпусу однотипної електричної машини.

Параметром, який визначає вплив електромагнітного поля ультрависоких, надвисоких та надзвичайно високих частот є щільність потоку енергії ($\text{Вт}/\text{м}^2$). Для високочастотних джерел він визначається зі співвідношення:

$$W = \frac{8PGKF^2(\theta)\eta}{R^2},$$

де P – потужність випромінювача, G – коефіцієнт підсилення антени, K – параметр, який враховує вплив підстилаючої поверхні (наприклад, землі), $F^2(\theta)$ – множник нормованої діаграми спрямованості випромінювання у вертикальній або горизонтальній площині, η – коефіцієнт передачі антено-фідерним трактом.

Зазвичай потужність випромінювання відома з технічної документації. Це ж стосується коефіцієнтів η та G . $F^2(\theta)$ визначається стандартною діаграмою спрямованості випромінювання для конкретного обладнання.

Параметр G можна оцінити зі співвідношення:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} SR,$$

де λ – довжина хвилі, S – площа розкриття антени, R – коефіцієнт використання площі антени.

Зазвичай $R = 0,35 - 0,70$.

У випадках, коли нормована діаграма спрямованості випромінювача невідома, можна провести її апроксимацію, виходячи з відомої ширини за рівнем половини потужності. Для апроксимації головного пелюстка діаграми спрямованості зручно використовувати криву Гауса:

$$F^2(\theta) = e^{-0,69(\theta/\theta_{0,5})^2},$$

де $\theta_{0,5}$ – напівширина діаграми спрямованості випромінювача.

Діаграми спрямованості можуть бути різними – від колових до вузькоспрямованих і характеризуватися різними значеннями $F^2(\theta)$ (табл. 1).

Таблиця 1 – Значення множника нормованої діаграми спрямованості

$\theta/\theta_{0,5}$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
$F^2(\theta/\theta_{0,5})$	1	0,84	0,5	0,21	$6,3 \cdot 10^{-2}$	$1,34 \cdot 10^{-2}$

Множник, який враховує характер підстилаючої поверхні K – для земної поверхні складає для частот поля 1–3 ГГц у межах 1,5–1,1. Цей діапазон охоплює практично робочі частоти засобів бездротового зв'язку. Ці показники усереднені, тому у практичній діяльності необхідно уточнювати реальні умови розповсюдження електромагнітних полів. Визначення електромагнітного навантаження в усіх точках певної площини доцільно виконувати у певній послідовності:

– визначення критичності впливу на електромагнітну обстановку окремих джерел;

– визначення просторових розподілів напруженостей полів та щільностей потоків енергії окремих джерел;

– визначення електромагнітного навантаження у кожній точці площі у залежності від кількості джерел, які впливають на електромагнітну обстановку;

– навантаження отриманих даних на координатну сітку.

Наприклад, якщо на електромагнітну обстановку впливають три джерела електромагнітних полів,

з яких одне є джерелом електромагнітного поля промислової частоти, а два інших – ультрависоких частот, то їхні діаграми спрямованості певним чином перетинаються (рис. 1).

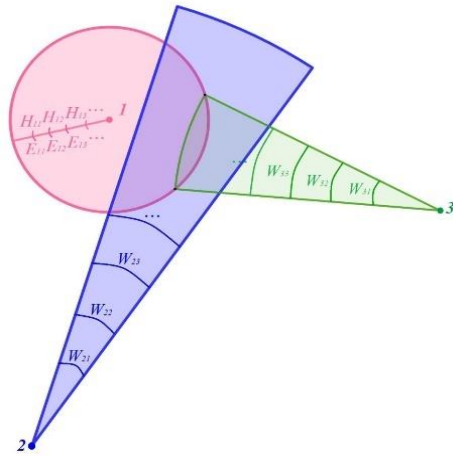


Рис. 1. Схематичні поширення електромагнітних полів джерел різних частотних діапазонів

Електромагнітне навантаження від джерела 1 у зонах, де діаграми спрямованості не перетинаються. Електромагнітне навантаження визначається зі співвідношення $\frac{E^2}{ГДР^2} + \frac{H^2}{ГДР^2}$ для кожної точки цієї зони з обраним кроком. Якщо сума цих складових не перевищує одиниці, то електромагнітна обстановка відповідає вимогам нормативу [2]. У зонах діаграм спрямованостей джерел 2 й 3 відсутній перетин з іншими діаграмами, відповідно визначаються показники $\frac{W_2}{ГДР_1}$ та $\frac{W_3}{ГДР_2}$. У зоні перетину цих двох діаграм спрямованості електромагнітне навантаження визначається сумою: $\frac{W_2}{ГДР_2} + \frac{W_3}{ГДР_3}$.

Відповідно у зонах перетину цих діаграм 2 з зоною 1 $\frac{E_1^2}{ГДР^2} + \frac{H_1^2}{ГДР^2} + \frac{W_2}{ГДР_2}$, а у зоні перетину трьох діаграм $\frac{E_1^2}{ГДР^2} + \frac{H_1^2}{ГДР^2} + \frac{W_2}{ГДР_2} + \frac{W_3}{ГДР_3}$.

У загальному випадку невизначеним показником є радіус діаграми першого джерела та довжина бісектрис кутів розкриття джерел 2 і 3. Якщо кути розкриття нормалізуються за показником зниження інтенсивності випромінювання удвічі, що відображено у показнику $\theta/\theta_{0,5}$, то відстань не регламентується жодним нормативом. Зазвичай для засобів мобільного

зв'язку, радіотехнічного обладнання цивільної авіації визначається тільки зона перевищення граничного значення для обладнання певної робочої частоти. Але для зон впливу кількох джерел електромагнітного поля електромагнітне навантаження може перевищувати норму навіть за нормативних значень кожного джерела. Тому у практичній діяльності доцільно охоплювати всю територію або площу, що розглядається. При цьому не виключається вплив неврахованих джерел на електромагнітну обстановку. Тому необхідною умовою коректного визначення електромагнітного навантаження на людей доцільно виміряти фонові значення електромагнітних полів в усіх частотних діапазонах.

Висновки

1. Визначення електромагнітного навантаження на середовище на стадіях проектування та експертизи будівництва, проектування розміщення електричного та електронного обладнання доцільно здійснювати з використанням моделювання поширення електромагнітних полів найбільш критичних джерел. Це надасть змогу оцінити електромагнітне навантаження у кожній точці території або обраної площі за різних схем розташування джерел електромагнітних полів та обрати найбільш раціональний варіант.

2. Передумовою коректного моделювання поширення електромагнітних полів є визначення найбільш прийнятних математичних функцій поширення полів різних частот та частотних діапазонів. Такі функції повинні мати припущення та спрощення, які дають прийнятну похибку обчислень й бути зручними для створення прикладного програмного забезпечення.

3. Сумарне електромагнітне навантаження визначається для кожної точки сумою відношень квадратів напруженостей електричної та магнітної складових електромагнітного поля до квадратів відповідних гранично допустимих значень, відношень щільностей потоків енергій до відповідних граничних значень. Сума усіх показників не повинна перевищувати одиниці. Слід враховувати можливість перевищення сумарного навантаження за нормативних значень полів окремих джерел

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи..

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСН 239-96. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань [Чинний від 2017-12-22]: затв. наказом М-ва охорони здоров'я України від 01.08.1996 р. № 239. Київ, 2017. 28 с. (Державні санітарні норми України). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0488-96#Text>
2. 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). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=48146

3. Grinchenko V.S. Mitigation of three-phase power line magnetic field by grid electromagnetic shield. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. Vol. 2018, Issue 4. P. 29–32. <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.029>.
4. Podoltsev, O. D., & Kucheriava, I. M. (2020). Three-dimensional model for computation of magnetic field of underground cable line. *Pratsi Institutu elektrodynamiki* 2020(56), 16–19. doi: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.56.016>
5. Xinmei Wang, Yifei Wang and Tao Wu. The Review of Electromagnetic Field Modeling Methods for Permanent-Magnet Linear Motors. *Energies* 2022, 15(10), 3595; <https://doi.org/10.3390/en15103595>
6. Bofan Li, Pengning Zhang Pengyang Li, Ze Liu, Wei Li and Jian Zhang. Research on Magnetic-Thermal-Force Multi-Physical Field Coupling of a High-Frequency Transformer with Different Winding Arrangements. *Electronics* 2023, 12(24), 5008; <https://doi.org/10.3390/electronics12245008>
7. Y. Li, Z. Luo, Y. Li, J. Zhu, B. Zhang and J. Zou, "Modeling of Fe-Based Soft Magnetic Materials for Multiphysical Analysis of Medium-Frequency Transformers," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 39, no. 10, pp. 12249-12260, Oct. 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2024.3393241>
8. Wenying Yang, Yuhang Pan, Zilan Qiu, Guofu Zhai. Electromagnetic transient model and field-circuit coupling numerical calculation of Sen transformer based on finite-element method. *Electric Power Systems Research*, Volume 214, Part B, 2023, 108941, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108941>
9. Getman, A. Cylindrical harmonic analysis of the magnetic field in the aperture of the superconducting winding of an electromagnet. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 1(5 (91)). P. 4–9. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123607>
10. Ходаковський, О., Левченко, Л., Колумбет, В., Козачук, А. і Кужавський, Д. Розрахунковий апарат моделювання поширення електромагнітних полів різнорідних джерел. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. 5, 1 (Чер. 2021), С. 34–38. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.04>.
11. Levchenko, L., Ausheva, N., Karaieva, N., Glyva, V., & Burdeina, N. (2024). Modeling of the external magnetic field of electric machines. *Advanced Information Systems*, 8(1), 24–30. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.1.03>
12. Левченко Л.О. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі. Системи обробки інформації. 2016. № 1. С. 29–37. http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2016_1_9
13. Левченко Л.О., Глива В.А., Карпенко С.Г. Просторові розподіли електромагнітних полів кабельних ліній електропередачі. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2016. Вип. 1/2016 (33). С. 114–121. http://nbuv.gov.ua/UJRN/emezs_2016_1_16

Received (Надійшла) 29.10.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 14.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

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; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1257-3351>;

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57210185162>.

Патерега Юрій Ігорович – асистент кафедри систем автоматизованого проектування, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,

Yurii Patereha – Assistant Professor, Department of Computer-Aided Design, Lviv Polytechnic National University, Ukraine;

e-mail: yurii.i.patereha@lpnu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-5110-008X>;

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=35093148000>.

Шабатура Тарас Вікторович – аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна;

Taras Shabatura – PhD student at the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Protection, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;

e-mail: Tarasshabatura@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-7525-5212>.

Determination of electromagnetic load on the environment by methods of modelling the propagation of electromagnetic fields

Valentyn Glyva, Yurii Patereha, Taras Shabatura

Abstract. The possibilities of using modelling of the propagation of electromagnetic fields from heterogeneous sources to determine electromagnetic loads in areas within individual buildings and premises have been investigated. Such modelling is advisable when it is impossible to determine the electromagnetic environment by field measurements – at the stages of design and examination of objects, design of electrical and electronic equipment placement, etc. A prerequisite for correct modelling is the determination of mathematical functions that describe the propagation of electromagnetic fields of different frequencies and frequency ranges. Such functions must have assumptions and simplifications that ensure an acceptable calculation error and be convenient for creating application software. The initial data for modelling is obtained from the technical documentation of the equipment that generates electromagnetic fields and from the results of measurements of the parameters of fields of similar equipment in operation. If there are diagrams of the directivity of electromagnetic fields and the propagation of low-frequency fields, the value of the electric and magnetic components of the electromagnetic field or the energy flux density is calculated at each point with the required step. The sum of the ratios of the squares of the electric and magnetic field intensities to the squares of the corresponding maximum permissible values must exceed one. This complies with current health standards. The distances for which the calculation is performed are determined in each specific case and must cover the entire territory or area for which the desired indicators are determined.

Keywords: electromagnetic load, modelling, maximum permissible level.

Г. Ю. Краснянський, Н. Б. Бурдейна

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

МОДИФІКАЦІЯ РОЗРАХУНКОВОЇ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕРМОІЗОЛЯЦІЇ СТІНИ БУДІВЛІ

Анотація. Критерієм ефективності термоізоляції стіни будівлі є зменшення теплових втрат стіни після покриття її поверхні шаром теплоізолюючого матеріалу. Теплові втрати визначаються товщиною і теплопровідністю матеріалів стіни і теплоізолятора та теплопередачею, пов'язаною із зовнішньою поверхнею стіни. Теплообмін між зовнішньою поверхнею будівлі та навколишнім середовищем ґрунтується на радіаційних та конвективних механізмах. Цей процес включає теплове випромінювання від сонця, теплообмін довгохвильовим випромінюванням з атмосферою, конвективний обмін із зовнішнім повітрям. Зазвичай, впливу падаючого сонячного випромінювання і обміну випромінюванням з атмосферою приділяється менше уваги ніж теплопередачі через стіну будівлі, обумовленій теплопровідністю. Для розрахунку теплових опорів зовнішньої поверхні стіни, пов'язаних з випромінюванням і конвекцією, прийнято користуватися спрощеною методикою, яку пропонують відповідні стандарти. Це при певних умовах може призводити до суттєвих похибок у визначенні теплових втрат будівлі. З іншого боку, не виправданим є використання емпіричних залежностей для визначення уявної температури атмосфери, необхідної для розрахунку теплового потоку довгохвильового випромінювання атмосфери. Ці залежності не є універсальними і були отримані для конкретних метеорологічних умов шляхом вимірювань у конкретних локаціях. Проведена модифікація розрахункової методики визначення ефективності термоізоляції стіни будівлі шляхом уточнення розрахунку теплопередачі між зовнішньою поверхнею стіни та навколишнім середовищем. Із рівняння теплового балансу для зовнішньої поверхні стіни з урахуванням теплового потоку поглинутого сонячного випромінювання і теплового потоку, обумовленого радіаційним охолодженням стіни отримані вирази, які дозволяють оцінювати ефективність термоізоляції стіни будівлі через зменшення теплових втрат стіни після покриття її зовнішньої поверхні шаром теплоізолюючого матеріалу.

Ключові слова: термоізоляція, теплові втрати, теплове випромінювання, конвекція, розрахункова методика.

Вступ

Забезпечення високої енергоефективності будівель в теперішній час набуває особливої актуальності. Це обумовлено, з одного боку, можливістю довгострокової економії енергії та коштів, з іншого – зменшенням впливу на оточуюче середовище завдяки скороченню викидів парникових газів через зниження залежності від викопного палива. Енергоефективні конструкції покращують тепловий комфорт та здоров'я людей за рахунок забезпечення оптимальної температури та кращої якості повітря всередині приміщення.

Для практичного вирішення задачі підвищення енергоефективності будівель та споруд велике значення має попередня оцінка ефективності термоізоляції стіни будівлі, покритої шаром теплоізолюючого матеріалу. Це доцільно робити розрахунковими методами, виходячи з фундаментальних співвідношень теплопередачі та теплофізичних характеристик будівельних, облицювальних та теплоізолюючих матеріалів. Раніше [1] при проведенні подібних розрахунків ми нехтували впливом сонячного випромінювання і радіаційного охолодження зовнішньої поверхні стіни. Ці фактори при певних умовах можуть істотно впливати на загальні теплові втрати будівлі.

Огляд літературних джерел. Критерієм ефективності термоізоляції стіни будівлі є зменшення теплових втрат стіни після покриття її поверхні шаром теплоізолюючого матеріалу. Теплові втрати визначаються товщиною і теплопровідністю матеріалів стіни і теплоізолятора та теплопередачею, пов'язаною із зовнішньою поверхнею стіни будівлі.

Теплообмін між зовнішньою поверхнею будівлі та навколишнім середовищем ґрунтується на радіаційних та конвективних механізмах. Цей процес

включає теплове випромінювання від сонця, теплообмін довгохвильовим випромінюванням з атмосферою, конвективний обмін із зовнішнім повітрям [2, 3]. Історично, вплив падаючого сонячного випромінювання і обміну випромінюванням з атмосферою вивчалися не так ретельно, як теплопередача через стіну будівлі, обумовлена теплопровідністю.

Тепловий потік від сонця змінюється залежно від географічної широти, пори року та часу доби. Так відповідно до кліматичних даних для України, щільність теплового потоку, що надходить на горизонтальну поверхню у випадку безхмарного неба, в окремих місцях доходить до 650 Вт/м². Взимку вища температура стіни будівлі, нагрітої сонячним випромінюванням, збільшує перепад температур між зовнішньою поверхнею стіни і атмосферним повітрям і, як наслідок, тепловий потік від стіни до зовнішнього середовища. І навпаки, завдяки сонцевому теплонагріттю зменшується різниця температур між внутрішнім повітрям і внутрішньою поверхнею стіни і відповідний тепловий потік від внутрішнього середовища до стіни. Це можна розглядати як виникнення додаткових теплових потоків до зовнішнього і внутрішнього середовищ, відповідно. Обидва є наслідком поглинутої сонячної енергії. Вони є особливо важливими для темних, погано ізольованих поверхонь [2].

Втрата тепла через довгохвильове інфрачервоне випромінювання, спрямоване у бік небосхилу призводить до радіаційного охолодження зовнішньої поверхні стіни [4]. Взимку радіаційне охолодження є негативним фактором, оскільки зниження температури на зовнішній поверхні стіни будівлі збільшує втрати тепла [5]. Воно найвище вночі, коли небо ясне, а вологість низька [6]. Довгохвильове теплове випромінювання виникає через різницю між температурою по-

вітря ззовні та уявною температурою атмосфери [5]. Ця величина є функцією зміни температури атмосфери з висотою і вертикального розподілу водяної пари в атмосфері. Уявна температура атмосфери є критично важливою характеристикою для коректної оцінки ефективності термоізоляції будівлі [6]. В той же час, вона не завжди відома із кліматичних даних. Для її оцінки існує велика кількість кореляцій, що співвідносять кліматичні параметри з інфрачервоним випромінюванням атмосфери [7, 8]. Ці кореляції прив'язані до місцевих кліматичних умов та точних локацій і відповідні емпіричні рівняння для визначення уявної температури атмосфери не є універсальними. При порівнянні уявних температур атмосфери, отриманих з даних про випромінювання, з даними, розрахованими за допомогою різних математичних моделей, було виявлено значні розбіжності [7].

Конвективний теплообмін є результатом різниці між температурою зовнішньої поверхні стіни та температурою навколишнього середовища. Для розрахунку теплового опору зовнішньої поверхні стіни, пов'язаного з конвекцією, зазвичай користуються спрощеною методикою, яку пропонує ДСТУ EN ISO 6946:2022. Це може призводити до суттєвих похибок у визначенні споживання енергії будівлею [9].

Метою дослідження є модифікація розрахункової методики визначення ефективності термоізоляції стіни будівлі шляхом уточнення розрахунку теплопередачі між зовнішньою поверхнею стіни та навколишнім середовищем.

Викладення основного матеріалу

Розглядали одновимірну задачу, тобто вважали, що теплота передається перпендикулярно до поверхні стіни, а ізотермами є площини, паралельні до неї. Крім того приймали, що умови ззовні і всередині будівлі, зокрема, температура і напрямок повітря, з часом не змінюються, тобто теплообмін є усталеним.

Припускали, що весь тепловий потік сонячного випромінювання поглинається лише зовнішньою поверхнею стіни. Тоді густина теплового потоку від внутрішнього середовища до стіни, яка відповідає тепловтратам стіни, повинна дорівнювати густині теплового потоку через стіну:

$$q_{in} = \frac{t_i - t_{se}}{R_{si} + R_1 + R_2}, \quad (1)$$

де t_i – температура всередині приміщення; t_{se} – температура зовнішньої поверхні стіни; R_{si} – тепловий опір внутрішньої поверхні стіни, пов'язаний з конвекцією і випромінюванням; R_1 і R_2 – теплові опори матеріалів стіни і теплоізолятора, відповідно.

В цьому випадку рівняння теплового балансу для зовнішньої поверхні стіни набуває вигляду:

$$q_{in} + \alpha_{se} I_{sol} = q_{out} + q_{sky}, \quad (2)$$

де $\alpha_{se} I_{sol}$ – тепловий потік поглинутого сонячного випромінювання; α_{se} – коефіцієнт поглинання сонячної енергії зовнішньою поверхнею стіни; I_{sol} – густина теплового потоку сонячного випромінювання;

$$q_{out} = (t_{se} - t_e) / R_{se} - \quad (3)$$

густина конвекційного і радіаційного теплового потоку від зовнішньої поверхні стіни, обумовленого різницею температур $t_{se} - t_e$; t_e – температура оточуючого середовища; R_{se} – відповідний тепловий опір зовнішньої поверхні стіни;

$$q_{sky} = (t_e - t_{sky}) / R_r - \quad (4)$$

густина теплового потоку, обумовленого радіаційним охолодженням зовнішньої поверхні стіни при $t_e \neq t_{sky}$; R_r – відповідний тепловий опір; t_{sky} – уявна температура атмосфери.

Із (1)–(4) отримуємо вираз для розрахунку зменшення теплових втрат стіни після покриття її зовнішньої поверхні шаром теплоізолюючого матеріалу:

$$\Delta q = \frac{1}{R_t (1-k)} \cdot \left(k \left(t_i - t_e + \frac{R_{se}}{R_r} (t_e - t_{sky}) \right) - \left(-R_{se} I_{sol} (\alpha_{se}^w - (1-k) \alpha_{se}^i) \right) \right), \quad (5)$$

де $R_t = R_{si} + R_1 + R_2 + R_{se}$ – повний тепловий опір стіни; $k = R_2 / R_t$; α_{se}^w і α_{se}^i – коефіцієнти поглинання сонячної енергії зовнішньою поверхнею нетеплоізольованої і теплоізольованої стіни, відповідно.

Теплові опори матеріалів стіни і теплоізолятора згідно закону Фур'є розраховуються за формулами:

$$R_1 = \frac{d_1}{\lambda_1}, \quad R_2 = \frac{d_2}{\lambda_2}, \quad (6)$$

де d_1 і d_2 – товщини нетеплоізольованої стіни і теплоізолятора, λ_1 і λ_2 – теплопровідності відповідних матеріалів.

Для оцінки величини теплового опору внутрішньої поверхні стіни з достатнім ступенем точності можуть бути використані типові значення для більшості прикладних задач, наведені в ДСТУ EN ISO 6946:2022. Так у випадку горизонтального потоку повітря $R_{si} = 0,13$ (м²×К)/Вт, вертикального вгору – 0,10 (м²×К)/Вт, вертикального вниз – 0,17 (м²×К)/Вт. Дані, наведені в стандарті, розраховані для випромінювальної здатності внутрішньої поверхні стіни $\varepsilon = 0,9$, середньої температури внутрішньої поверхні і оточуючого середовища 20 °С.

Тепловий опір зовнішньої поверхні стіни, обумовлений конвекцією і випромінюванням може бути знайдений із співвідношення:

$$\frac{1}{R_{se}} = \frac{1}{R_{ce}} + \frac{1}{R_{re}}, \quad (7)$$

де R_{ce} – тепловий опір, пов'язаний з конвекцією, R_{re} – тепловий опір, пов'язаний з випромінюванням.

При запису (7) враховано, що в електричній схемі заміщення ці опори з'єднуються паралельно оскільки відповідні процеси відбуваються незалежно один від одного. Для оцінки R_{ce} ДСТУ EN ISO 6946:2022 пропонує просте співвідношення:

$$1/R_{ce} = 4 + 4v, \quad (8)$$

де v – швидкість повітря біля зовнішньої поверхні стіни.

Відповідно до [7, 10], де порівнювались результати безпосередніх вимірювань з розрахунками за відомими моделями, (8) призводить до суттєвої похибки у визначенні R_{ce} . В той же час, адекватні результати були отримані з використанням моделі ASHRAE (Американського товариства інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря), відповідно до якої [7]:

$$1/R_{ce} = 18,6(0,25v_{10})^{0,605}, \quad (9)$$

де $v_{10} \geq 2$ м/с – швидкість повітря на висоті 10 м і відстані 0,3 м від стіни.

Для знаходження виразу для R_{re} врахуємо, що відповідно до закону Стефана – Больцмана густина радіаційного теплового потоку від зовнішньої поверхні стіни визначається формулою:

$$q_{r,out} = \varepsilon\sigma(T_{se}^4 - T_e^4), \quad (10)$$

де ε – випромінювальна здатність зовнішньої поверхні стіни; σ – стала Стефана-Больцмана; T_{se} і T_e – відповідні термодинамічні температури. Після порівняння (10) і (3) з урахуванням (7) отримаємо:

$$\frac{1}{R_{re}} = \frac{\varepsilon\sigma(T_{se}^4 - T_e^4)}{T_{se} - T_e} = \varepsilon\sigma(T_{se} + T_e)(T_{se}^2 + T_e^2). \quad (11)$$

Відмітимо, що наближена формула для $1/R_{re}$, наведена в ДСТУ EN ISO 6946:2022, може бути отримана із (11) шляхом лінеаризації при $T_{se} - T_e \ll \bar{T}_{se,e}$, де $\bar{T}_{se,e}$ – середнє значення T_{se} і T_e . Остаточнo, для розрахунку R_{se} із (7), (9), (11) маємо:

$$R_{se} = \frac{1}{18,6(0,25V_{10})^{0,605} + \varepsilon\sigma(T_{se} + T_e)(T_{se}^2 + T_e^2)}. \quad (12)$$

Для врахування внеску в тепловтрати радіаційного охолодження зовнішньої поверхні стіни небосхил розглядають як сіре тіло [2, 5], характеристикою якого є t_{sky} . В цьому наближенні для густини відповідного теплового потоку маємо:

$$q_{sky} = F_{r,se}\varepsilon\sigma(T_{se}^4 - T_{sky}^4), \quad (13)$$

де F_{se-sky} – кутовий коефіцієнт випромінювання між стіною і небосхилом; T_{se} і T_{sky} – термодинамічні температури. Порівнюючи з (4), отримуємо:

$$R_r = \frac{T_e - T_{sky}}{F_{r,se}\varepsilon\sigma(T_{se}^4 - T_{sky}^4)}. \quad (14)$$

Якщо припустити $T_{se} \approx T_e$, то вираз (14) може бути перетворений аналогічно до (11):

$$R_r = \frac{1}{F_{r,se}\varepsilon\sigma(T_e + T_{sky})(T_e^2 + T_{sky}^2)}. \quad (15)$$

Спрощений лінеаризований вираз для R_r , наведений в ДСТУ EN ISO 52016-1:2022, може призводити до помітної похибки обчислень у випадку, коли не виконується співвідношення $T_e - T_{sky} \ll \bar{T}_{e,sky}$, де

$\bar{T}_{e,sky}$ – середнє значення T_e і $T_{e,sky}$. При розрахунку R_r за формулою (15) для кутового коефіцієнта випромінювання між стіною і небосхилом F_{se-sky} використовують значення відповідно до ДСТУ EN ISO 52016-1:2022. Так для незатіненої вертикальної стіни стандарт дає $F_{se-sky} = 0,5$. Використання значення кутового коефіцієнта випромінювання 0,5 для вертикальних поверхонь в енергетичному моделюванні – загальноживаний підхід. Він передбачає постійну уявну температуру атмосфери незалежно від напрямку поширення теплового потоку довгохвильового випромінювання атмосфери, що полегшує обчислювальний процес. Водночас цей потік змінюється від максимального у вертикальному напрямку до мінімального – у горизонтальному. Таким чином, такий підхід не можна вважати повністю репрезентативним, що потрібно враховувати при аналізі результатів розрахунків.

Коефіцієнти поглинання сонячної енергії зовнішньою поверхнею стіни a_{se}^w , a_{se}^i і випромінювальна здатність ε є табличними величинами. Для визначення густини теплового потоку сонячного випромінювання I_{sol} для даної локації і пори року використовують кліматичні бази даних, які є у широкому доступі.

Уявна температура атмосфери T_{sky} зазвичай є невідомою з кліматичних даних. Її є сенс оцінювати відповідно до ДСТУ EN ISO 52016-1:2022, де для помірних широт пропонується значення $T_e - T_{sky}$, яке дорівнює 11 К. Варто зазначити, що стандарт враховує кліматичну класифікацію, засновану лише на широтах, розрізняючи субполярні, помірні та тропічні зони. Розрахунки з використанням спрощеної моделі, наведеної у стандарті, не завжди адекватні для помірних регіонів з коливаннями вологості. В той же час, використання відомих емпіричних залежностей для визначення уявної температури атмосфери не є виправданим оскільки вони були отримані для конкретних метеорологічних умов шляхом вимірювань у конкретних місцях.

Висновки

1. Представлені результати розрахунків ефективності термоізоляції стіни будівлі з урахуванням впливу сонячного випромінювання і радіаційного охолодження зовнішньої поверхні стіни. Ці фактори при певних умовах можуть істотно впливати на загальні теплові втрати будівлі.

2. Проведена модифікація розрахункової методики визначення ефективності термоізоляції стіни будівлі шляхом уточнення розрахунку теплопередачі між зовнішньою поверхнею стіни та навколишнім середовищем.

3. Із рівняння теплового балансу для зовнішньої поверхні стіни з урахуванням теплового потоку поглинутого сонячного випромінювання і теплового потоку, обумовленого радіаційним охолодженням стіни отримані вирази, які дозволяють оцінювати ефективність термоізоляції стіни будівлі через зменшення теплових втрат стіни після покриття її зовнішньої поверхні шаром теплоізолюючого матеріалу.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені

в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленної роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Burdeina N., Glyva V., Levchenko L., Krasnianskyi G., Biruk Y., Zozulya S., Zozulya L., Kashlev M., Grzelakowski T. Innovative Approaches to Designing Sound Insulation in Historic Buildings during Reconstruction. *International Journal of Conservation Science*. 2025. Vol. 16, Special Issue. P. 373-382. <https://doi.org/10.36868/IJCS.2025.si.01>
- Akbari H., Lodi C., Muscio A., Tartarini P. Analysis of a New Index for the Thermal Performance of Horizontal Opaque Building Components in Summer. *Atmosphere*. 2021. 12. 862. <https://doi.org/10.3390/atmos12070862>
- Muscio A., Akbari H. An Index for the Overall Performance of Opaque Building Elements Subjected to Solar Radiation. *Energy and Buildings*. 2017. V. 157. P. 184-194. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.010>
- Asdrubali F., Evangelisti L., Grazieschi G., Guattari C. Influence of Sky Temperatures on Building Energy Needs. *Proceedings of Building Simulation 2019. 16th Conference of IBPSA. Rome, Italy, Sept. 2-4, 2019. P.293-299.* <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210326>
- Chen J., Lu L. Development of Radiative Cooling and Its Integration With Buildings: A Comprehensive Review. *Solar Energy*. 2020. 212. P. 125–151. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.013>
- Li M., Jiang Y., Coimbra C.F.M. On the Determination of Atmospheric Longwave Irradiance under All-Sky Conditions. *Solar Energy* 2017. 144. P. 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.006>
- De Cristo E., Evangelisti L., Guattari C., De Lieto V. R. An Experimental Direct Model for the Sky Temperature Evaluation in the Mediterranean Area: A Preliminary Investigation. *Energies*. 2024. 17. P. 2228-2043. <https://doi.org/10.3390/en17092228>
- Evangelisti L., Guattari C., Asdrubali F. On the Sky Temperature Models and Their Influence on Buildings Energy Performance: A Critical Review. *Energy and Buildings*. 2019. 183. P. 607–625. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.037>
- Evangelisti L., Guattari C., Gori P., Bianchi F. Heat Transfer Study of External Convective and Radiative Coefficients for Building Applications. *Energy and Buildings*. 2017. 151. P. 429–438. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.004>
- Kahsay M.T., Bitsuamlak G, Tariku F. Numerical Analysis of Convective Heat Transfer Coefficient for Building Facades. *Journal of Building Physics*. 2018.42(6) .P. 727-749. <https://doi.org/10.1177/1744259118791207>

Received (Надійшла) 8.10.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Краснянський Григорій Юхимович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики, Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна;

Grygorii Krasnianskyi – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;

e-mail: krasnianskyi.giu@knuba.edu.ua, ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2421-1270>,

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6507131193>.

Бурдейна Наталія Борисівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри фізики, Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна;

Nataliia Burdeina – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Physics, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;

e-mail: burdeina.nb@knuba.edu.ua, ORCID Author ID: orcid.org/0000-0002-2812-1387,

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57220047954>.

Modification of the calculation method for determining the effectiveness of thermal insulation of a building wall

Grygorii Krasnianskyi, Nataliia Burdeina

Abstract. The criterion for the effectiveness of thermal insulation of a building wall is the reduction of heat loss from the wall after covering its surface with a layer of thermal insulating material. Heat loss is determined by the thickness and thermal conductivity of the wall and insulation materials, as well as the heat transfer associated with the outer surface of the wall. Heat exchange between the outer surface of the building and the surrounding environment is based on radiative and convective mechanisms. This process includes thermal radiation from the sun, heat exchange through long-wave radiation with the atmosphere, and convective exchange with the external air. Typically, less attention is paid to the effects of incident solar radiation and radiation exchange with the atmosphere than to heat transfer through the building wall caused by thermal conductivity. For calculating the thermal resistances of the outer surface of the wall related to radiation and convection, a simplified methodology proposed by relevant standards is usually employed. Under certain conditions, this can lead to significant errors in determining the heat loss of the building. On the other hand, the use of empirical dependencies to determine the apparent temperature of the atmosphere, necessary for calculating the thermal flow of long-wave radiation from the atmosphere, is unjustified. These dependencies are not universal and were obtained for specific meteorological conditions through measurements in specific locations. A modification of the calculation method for determining the effectiveness of thermal insulation of a building wall has been carried out by refining the calculation of heat transfer between the outer surface of the wall and the surrounding environment. From the thermal balance equation for the outer surface of the wall, considering the thermal flow of absorbed solar radiation and the thermal flow caused by the radiative cooling of the wall, expressions have been derived that allow for the assessment of the effectiveness of the thermal insulation of the building wall through the reduction of heat loss from the wall after covering its outer surface with a layer of thermal insulating material.

Keywords: thermal insulation, heat losses, thermal radiation, convection, calculation method.

Є. Є. Лашко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна

МЕТРОЛОГІЧНА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ДЖЕРЕЛ ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ ГІРНИЧОВИДОБУВНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Анотація. **Актуальність.** Гірничовидобувна промисловість належить до найбільш екологічно навантажених галузей промисловості, діяльність якої супроводжується утворенням значних обсягів пилу, газоподібних викидів, аерозолів і вторинного забруднення територій. **Об'єкт дослідження:** математична модель метрологічної оцінки результатів вимірювань. **Мета статті:** розробка науково обгрунтованого підходу до метрологічної оцінки результатів вимірювань джерел техногенного забруднення гірничовидобувного підприємства з урахуванням невизначеності вимірювань і факторів впливу виробничого середовища. **Результати дослідження.** У статті розглянуто питання метрологічного забезпечення вимірювань джерел техногенного забруднення гірничовидобувних підприємств. Обгрунтовано необхідність застосування метрологічно підтверджених методів вимірювань для забезпечення достовірності результатів екологічного моніторингу. Запропоновано підхід до оцінювання результатів вимірювань на основі аналізу похибок, невизначеності вимірювань і відповідності результатів встановленим нормативним вимогам. Розроблено математичну модель оцінювання сумарної невизначеності результатів вимірювань концентрацій забруднювальних речовин у повітрі та на поверхнях гірничовидобувного підприємства. **Висновки.** Впровадження метрологічно обгрунтованих процедур дозволяє підвищити достовірність екологічної оцінки техногенного впливу й ефективність управління еколого-виробничою безпекою. Сфера використання отриманих результатів: результати вимірювань концентрацій забруднювальних речовин є основою для прийняття управлінських рішень, розроблення природоохоронних заходів, оцінювання ризиків для персоналу та населення.

Ключові слова: метрологічне забезпечення, стандартизація, техногенне забруднення, гірничовидобувне підприємство, невизначеність вимірювань, екологічний моніторинг, пилове забруднення.

Вступ

Постановка проблеми. Сучасні гірничовидобувні підприємства є складними техногенними системами, функціонування яких супроводжується утворенням значних обсягів пилогазових викидів, аерозолів, продуктів згоряння палива, а також вторинного пилення від відкритих поверхонь кар'єрів, відвалів і транспортних комунікацій.

В умовах посилення екологічних вимог і необхідності забезпечення екологічної безпеки промислових регіонів особливого значення набуває достовірність результатів вимірювань параметрів техногенного забруднення.

Однією з ключових проблем сучасного екологічного моніторингу є не лише визначення концентрацій забруднюючих речовин, а й оцінювання метрологічної надійності отриманих результатів. Недостатня увага до невизначеності вимірювань, впливу умов відбору проб, калібрування обладнання та людського фактора може призводити до систематичних похибок, що у свою чергу впливає на прийняття управлінських і природоохоронних рішень.

Для гірничовидобувних підприємств зазначена проблема ускладнюється значною просторовою та часовою мінливістю джерел забруднення, нестабільністю технологічних процесів, складними аеродинамічними умовами кар'єрного простору та впливом метеорологічних факторів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання метрологічного забезпечення екологічних вимірювань розглядається у кількох взаємопов'язаних наукових напрямках: стандартизація вимірювань, оцінювання невизначеності результатів,

забезпечення якості вимірювальних процедур і розвиток систем моніторингу промислових викидів.

Важливим етапом розвитку сучасної метрології стало впровадження стандарту ISO/IEC 17025, який визначає вимоги до сертифікації випробувальних і калібрувальних лабораторій. Дослідження показують, що забезпечення метрологічної простежуваності та валідація методів вимірювання є основними умовами отримання достовірних результатів, особливо у випадку складних вимірювальних задач [2].

У роботах, присвячених аналізу вимог міжнародних стандартів, підкреслюється необхідність відповідності вимірювального обладнання конкретному вимірювальному завданню й обов'язковість дотримання встановлених процедур виконання вимірювань, що забезпечує необхідний рівень точності та відтворюваності результатів [3].

Дослідження у сфері стандартизації методів вимірювання також підтверджують, що узгодженість методик, правильний вибір діапазону вимірювань і метрологічне підтвердження обладнання є визначальними факторами достовірності результатів [4].

Одним із ключових напрямів сучасних досліджень є оцінювання невизначеності вимірювань у природному середовищі. На відміну від лабораторних умов, екологічні вимірювання характеризуються значною варіабельністю параметрів середовища, що призводить до суттєвого зростання сумарної невизначеності.

Показано, що значний внесок у загальний бюджет невизначеності може становити саме етап відбору проб, особливо при вимірюваннях концентрацій забруднюючих речовин у повітрі, ґрунті чи воді [5]. Це положення є особливо актуальним для гірни-

човидобувних підприємств, де концентрації пилу мають імпульсний характер і значною мірою залежать від технологічних операцій.

У роботах, присвячених оцінюванню якості моделей атмосферного забруднення, доведено, що допустимі характеристики моделей повинні визначатися з урахуванням невизначеності вимірювань, оскільки самі експериментальні дані мають обмежену точність [6]. Це свідчить про необхідність інтеграції метрологічних підходів у моделювання процесів розсіювання забруднень.

У гірничій промисловості питання забезпечення якості аналітичних досліджень традиційно розглядаються у контексті процедур QA/QC. Дослідження, присвячені дорозвідці родовищ, демонструють ефективність використання дублювання вимірювань, контрольних проб і статистичного порівняння результатів для підвищення достовірності даних [7].

Водночас, більшість існуючих досліджень зосереджена на геохімічних або лабораторних вимірюваннях, тоді як питання метрологічної оцінки польових вимірювань атмосферних викидів залишаються недостатньо дослідженими.

Останні дослідження демонструють активний розвиток автоматизованих систем моніторингу пилових концентрацій із застосуванням цифрових технологій і методів штучного інтелекту. Такі системи дозволяють отримувати дані у реальному часі, проте створюють нові метрологічні виклики, пов'язані з калібруванням сенсорів, дрейфом характеристик і залежністю показів від метеорологічних умов [8].

Додатково зазначається, що мережі низькоякісних сенсорів потребують складних процедур калібрування для забезпечення достовірності даних, оскільки без регулярної перевірки їхні покази можуть втрачати точність [9].

Аналіз попередніх досліджень показує, що існуючі підходи до оцінювання джерел техногенного забруднення переважно орієнтовані на визначення концентрацій забруднюючих речовин без достатнього врахування метрологічної складової результатів вимірювань.

Особливо це стосується гірничовидобувних підприємств, де:

- джерела забруднення є просторово розподіленими;
- інтенсивність викидів має випадковий характер;
- умови вимірювань змінюються у часі;
- відбір проб часто здійснюється у нестаціонарних умовах.

Отже, актуальною науково-практичною задачею є розробка підходу до метрологічної оцінки результатів вимірювань джерел техногенного забруднення, який урахує специфіку гірничовидобувного виробництва та дозволить підвищити достовірність екологічного моніторингу.

Метою роботи є розробка науково обґрунтованого підходу до метрологічної оцінки результатів вимірювань джерел техногенного забруднення гірничовидобувного підприємства з урахуванням не-

значеності вимірювань і факторів впливу виробничого середовища.

Основний матеріал

Основними джерелами техногенного забруднення на гірничовидобувних підприємствах є:

- буропідривні роботи;
- процеси дроблення та транспортування гірничої маси;
- відвали та хвостосховища;
- автомобільні та конвеєрні транспортні системи;
- допоміжні виробничі процеси.

Забруднення проявляється у вигляді пилових викидів, газоподібних продуктів згорання, вторинного пиління та локального забруднення ґрунтів. Особливістю таких джерел є їх просторово-часова мінливість, що суттєво ускладнює процес вимірювання та подальшу інтерпретацію результатів.

Метрологічне забезпечення вимірювань включає сукупність організаційних і технічних заходів, спрямованих на досягнення цілісності та необхідної точності вимірювань. До основних складових належать:

- застосування повірених і каліброваних засобів вимірювальної техніки;
- використання стандартизованих методик вимірювань;
- контроль умов проведення вимірювань;
- оцінка похибок і невизначеності результатів;
- статистична обробка даних.

Для умов гірничовидобувного виробництва додатковими факторами впливу є підвищена запиленість, вібрації, температурні коливання та нерівномірність потоків забруднювальних речовин.

Процеси утворення, переносу й осадження пилових частинок у відкритих гірничих виробках характеризуються складною нелінійною взаємодією технологічних процесів й аеродинамічних явищ [10].

На відміну від стаціонарних джерел викидів, пилові джерела кар'єрів мають просторово розподілений і часово змінний характер, що зумовлює необхідність використання стохастичних підходів до опису результатів вимірювань.

У загальному вигляді миттєва концентрація пилу описується як:

$$C(t, x, y, z) = F \left(\begin{matrix} Q(t), V(t), T(t), H(t), \\ S(t), G(t), M(t) \end{matrix} \right), \quad (1)$$

де $Q(t)$ – інтенсивність пиловиділення; $V(t)$ – вектор швидкості повітряного потоку; $T(t)$ – температура; $H(t)$ – відносна вологість; $S(t)$ – площа активного пиління; $G(t)$ – параметри турбулентності; $M(t)$ – характеристики механічного впливу (рух транспорту, дроблення, підривні роботи).

Результат вимірювання є інтегральною величиною за певний інтервал часу усереднення:

$$C_{\tau} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} C(t) dt, \quad (2)$$

де $C(t)$ – функція часу; τ – тривалість інтервалу усереднення.

Отже, навіть за сталих середніх значеннях параметрів результат вимірювання містить випадкову складову, пов'язану з турбулентними флуктуаціями й імпульсними викидами пилу.

Інтенсивність пиловиділення можна представити у вигляді випадкового процесу:

$$Q(t) = Q_0 + \xi(t), \quad (3)$$

де Q_0 – детермінована частина величини; $\xi(t)$ – випадкова флуктуація.

Для технологічних операцій циклічного типу (буріння, дроблення, транспортні операції) доцільним є використання моделі пуассонівських процесів, що дозволяє описати випадкову появу імпульсних джерел пилу. Автокореляційна функція процесу пиловиділення визначається як:

$$R_Q(\tau) = E[\zeta(t)\zeta(t+\tau)], \quad (4)$$

де E – математичне сподівання, що дозволяє врахувати часову залежність між послідовними вимірюваннями.

Перенесення пилових частинок описується рівнянням адвекції–дифузії:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \cdot \nabla C = \nabla \cdot (K_t \nabla C) + S_Q - \lambda C, \quad (5)$$

де $C=C(x, y, z, t)$ – концентрація речовини; t – час; $V=(u, v, w)$ – вектор швидкості потоку; ∇C – градієнт концентрації; $U \cdot \nabla C$ – конвективний перенос; K_t – коефіцієнт турбулентної дифузії; $\nabla \cdot (K_t \nabla C)$ – дифузійна складова; S_Q – джерело пилу; λC – коефіцієнт осадження частинок.

Турбулентність призводить до випадкових флуктуацій швидкості потоку:

$$V(t) = \bar{V} + v'(t), \quad (6)$$

де \bar{V} – середнє (математичне сподівання або осереднене за часом значення); $v'(t)$ – пульсаційна (відхильна) складова, для якої виконується умова, що формує додаткову складову невизначеності результатів вимірювання:

$$u_t^2 = \left(\frac{\partial C}{\partial U} \right)^2 \cdot u^2(U), \quad (7)$$

де u_t – сумарна стандартна невизначеність; $\partial C/\partial U$ – коефіцієнт чутливості; $u(U)$ – стандартна невизначеність величини.

Для кар'єрних умов характерна анізотропна турбулентність, обумовлена складною геометрією виробки, що додатково підвищує варіабельність концентрацій.

Сумарна стандартна невизначеність визначається відповідно до узагальненого закону поширення невизначеності:

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) +$$

$$+ 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial F}{\partial x_j} \right) \text{cov}(x_i, x_j), \quad (8)$$

де F – це функція від кількох змінних, яка вимірюється чи розраховується; $\text{cov}(x_i, x_j)$ – це коваріація між двома змінними, яка враховує їхню кореляцію.

Умови гірничого виробництва характеризуються корельованістю параметрів, зокрема між швидкістю вітру й інтенсивністю пиління, а також між вологістю та дисперсністю частинок. Урахування коваріаційних членів дозволяє уникнути систематичного заниження оцінки невизначеності.

Сумарна невизначеність результату вимірювання подається як:

$$u_c^2 = u_{inst}^2 + u_{cal}^2 + u_{samp}^2 + u_{turb}^2 + u_{proc}^2, \quad (9)$$

де u_i – стандартні невизначеності окремих складових (інструментальна, калібрувальна, відбору проб, турбулентності); u_{proc} – складова, пов'язана зі стохастичною мінливістю технологічного процесу.

Остання визначається через дисперсію інтенсивності пиловиділення:

$$u_{proc}^2 = \left(\frac{\partial C}{\partial Q} \right)^2 D_Q. \quad (10)$$

Запропонована модель дозволяє розділити метрологічну та фізичну складові невизначеності, що є принципово важливим для інтерпретації результатів у задачах цивільної безпеки.

Експериментальні дослідження проводилися для умов типового відкритого гірничовидобувного підприємства з багатоджерельною структурою пиловиділення. Основними зонами контролю визначено ділянки інтенсивного технологічного впливу, транспортні коридори та периферійні ділянки кар'єру.

Розташування контрольних точок визначалося з урахуванням напрямків переважаючих вітрів, геометрії кар'єру та можливих зон накопичення пилу.

Вимірювання концентрацій пилу здійснювалися із застосуванням комбінованого підходу, що включає гравіметричні й оптичні методи. Для кожної точки виконувалась серія вимірювань із різними інтервалами усереднення, що дозволило оцінити вплив часової мінливості процесів.

Одночасно реєструвалися метеорологічні параметри, що дозволило сформувати масив даних для подальшого статистичного аналізу.

З метою підвищення достовірності результатів застосовувалися:

- дублювання вимірювань різними засобами;
- контроль стабільності показів приладів;
- виключення аномальних значень на основі статистичних критеріїв.

Середнє значення концентрації визначалося як:

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i, \quad (11)$$

а дисперсія результатів:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2. \quad (12)$$

Додатково визначалась автокореляційна функція вибірки, що дозволило оцінити часову залежність вимірювань й обґрунтувати інтервал усереднення.

Бюджет невизначеності формувався відповідно до рекомендацій GUM із урахуванням специфіки польових вимірювань. До складу бюджету включено інструментальну, калібрувальну, методологічну та стохастичну складові. Загальна стандартна невизначеність визначалась як:

$$u_c = \sqrt{u_{inst}^2 + u_{cal}^2 + u_{samp}^2 + u_{turb}^2 + u_{proc}^2 + u_{stat}^2 \dots} \quad (13)$$

Просторова неоднорідність пилових потоків є основним джерелом невизначеності. Для її оцінювання використовувалась дисперсія концентрацій у різних точках вимірювання:

$$u_{samp} = \frac{s_{spatial}}{\sqrt{n}}. \quad (14)$$

Отримані результати підтвердили, що для відкритих кар'єрів ця складова може перевищувати інструментальну невизначеність у декілька разів.

Флуктуації швидкості повітряного потоку оцінювалися за результатами вимірювань анемометричних параметрів. Турбулентна складова визначалась як:

$$u_{turb} = \left(\frac{\partial C}{\partial V} \right) \cdot \sigma_V, \quad (15)$$

де σ_V – стандартне відхилення швидкості.

Встановлено, що за несприятливих метеорологічних умов внесок цієї складової може досягати 20–30 % сумарної невизначеності.

Коливання інтенсивності роботи технологічного обладнання призводять до додаткової мінливості концентрацій.

Ця складова оцінювалась через дисперсію значень концентрацій у періоди активних технологічних операцій.

Розрахунок розсіювання здійснювався з урахуванням усіх факторів впливу та необхідних інструментів для розрахунку й аналізу (рис. 1).

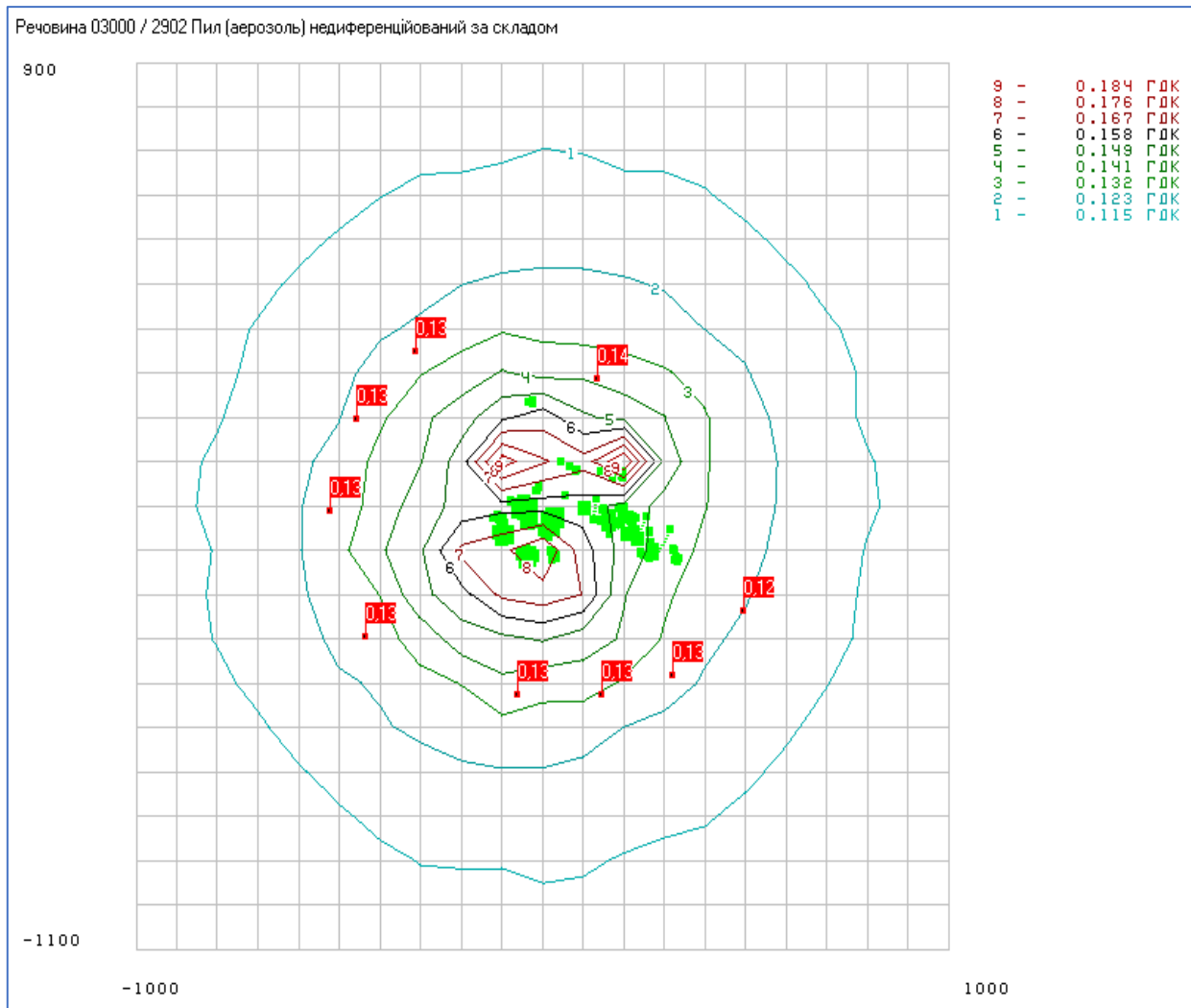


Рис. 1. Концентрації у заданих точках розрахункового промайданчику Рижівського гранітного кар'єру (м. Горішні Плавні Полтавської обл.)

Отримані результати показали, що врахування стохастичного характеру пиловиділення призводить до збільшення оціненої розширеної невизначеності на 15–35 % порівняно з класичними підходами. Це свідчить про систематичне заниження оцінок ризику за використання спрощених методик.

Установлено, що найбільший внесок у сумарну невизначеність формують процес відбору проб і турбулентна мінливість повітряного потоку.

Водночас, інструментальна складова у більшості випадків не перевищує 10–15 % загальної невизначеності.

Запропонована модель дозволяє пояснити значні розбіжності між результатами вимірювань, отриманими у різні часові інтервали, та забезпечує коректну інтерпретацію даних за оцінки відповідності нормативним вимогам [11].

Функціонування гірничовидобувних підприємств супроводжується формуванням небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть створювати загрозу здоров'ю працівників, населенню прилеглих територій і об'єктам критичної інфраструктури.

До таких факторів належать пилові аерозолі, газоподібні продукти згоряння, вторинне пиління від відвалів і транспортних потоків.

У системі цивільної безпеки результати вимірювань концентрацій забруднюючих речовин виконують функцію інформаційної основи для:

- оцінки рівнів безпеки;
- прогнозування розвитку небезпечних ситуацій;
- прийняття управлінських рішень щодо обмеження виробничих процесів;
- впровадження захисних заходів;
- інформування органів місцевого самоврядування та служб цивільного захисту.

Проте, прийняття рішень на основі вимірювань без урахування їх метрологічної невизначеності може призводити як до недооцінки рівня безпеки, так і до необґрунтованих обмежень виробництва. У випадках, коли виміряні концентрації знаходяться поблизу гранично допустимих значень, саме величина невизначеності визначає правильність класифікації ситуації як безпечної або потенційно небезпечної.

Запропонована у роботі модель дозволяє перейти від детермінованої оцінки концентрацій до ймовірнісної оцінки безпеки, що відповідає сучасним принципам управління ризиками у сфері цивільної безпеки.

У рамках концепції цивільної безпеки результат вимірювання концентрації пилу розглядається як випадкова величина:

$$C \approx N(\bar{C}, u_c^2), \quad (16)$$

де N – стандартне позначення нормального (гаусівського) розподілу з математичним сподіванням і дисперсією, що дозволяє визначити ймовірність перевищення граничного значення:

$$P(C > C_{\text{lim}}) = 1 - \Phi\left(\frac{C_{\text{lim}} - \bar{C}}{u_c}\right), \quad (17)$$

де Φ – функція нормального розподілу.

Отже, замість бінарної оцінки («перевищення / відсутність перевищення») формується кількісна оцінка ризику, яка може бути використана для:

- раннього попередження небезпечних ситуацій;
- адаптивного управління технологічними процесами;
- оптимізації режимів пилопригнічення;
- формування сценаріїв реагування служб цивільного захисту.

Особливої актуальності це набуває для кар'єрів, розташованих поблизу населених пунктів, де пилове забруднення може мати транскордонний характер у межах локальної територіальної громади. Наукова новизна отриманих результатів полягає у такому:

1. Розробці математичної моделі метрологічної оцінки результатів вимірювань пилових джерел гірничовидобувного підприємства з урахуванням турбулентної мінливості повітряного потоку та стохастичного характеру пиловиділення.

2. Вдосконаленні підходу до формування бюджету невизначеності шляхом уведення складової, пов'язаної з турбулентними флуктуаціями та просторовою неоднорідністю пилових потоків.

3. Запропонованні підходу до використання результатів метрологічної оцінки у задачах управління ризиками у сфері цивільної безпеки.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованого підходу для:

- підвищення достовірності систем екологічного та виробничого моніторингу;
- обґрунтування заходів зниження пилового навантаження;
- підтримки прийняття рішень службами цивільного захисту;
- зменшення ризиків впливу техногенних факторів на персонал і населення.

Висновки

1. Метрологічна оцінка результатів вимірювань є необхідною умовою достовірного визначення рівнів техногенного забруднення гірничовидобувних підприємств.

2. Основними джерелами невизначеності є нестабільність технологічних процесів й особливості відбору проб у складних виробничих умовах.

3. Запропонована математична модель дозволяє комплексно оцінювати вплив факторів виробничого середовища на результати вимірювань.

4. Упровадження метрологічно обґрунтованих процедур сприяє підвищенню ефективності систем еколого-виробничого моніторингу й управління техногенною безпекою.

Використання засобів штучного інтелекту

Автор підтверджує, що не використовував технології штучного інтелекту при створенні представленної роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lashko, Y., Chencheva, O., Levchenko, L., Myshchenko, I., & Bolibrukh, B. (2025). Evaluation of the aerological condition during open-pit mining operations based on three-dimensional models of quarries. *Advanced Information Systems*, 9(2), 18–24. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.2.03>
2. Voitenko, S., Barvynskyi, O., Babych, O. & Mosharenkov, V. (2022). CONSIDERATION OF THE REQUIREMENTS OF EN ISO/IEC 17025 REGARDING THE CALIBRATION LABORATORY IN THE QUESTIONS OF THE PROCESS OF THE VALIDATION OF PROCEDURES FOR THE CALIBRATION OF MEASURING EQUIPMENT. *CONTROL, NAVIGATION AND COMMUNICATION SYSTEMS*, 3(69), 13–17. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.3.013>
3. Melnichenko, O., Horoshilov, O., & Maletska, O. (2019). Analysis of requirements for equipment and methods under ISO/IEC 17025:2017. *Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia*, 80(1), 67–74. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.01.067>
4. Trishch, R., Maletska, O., Cherniak, O., Semionova, J., & Jancis, V. (2020). ANALYSIS OF THE REQUIREMENTS OF INTERNATIONAL AND NATIONAL STANDARDS FOR MEASUREMENT METHODS AND METROLOGICAL EQUIPMENT. *INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SCIENTIFIC SOLUTIONS FOR INDUSTRIES*, (1(11), 156–162. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.156>
5. Glavič-Cindro, D., Hazou, E., Korun, M., Krištof, R., Osterman, P., Petrovič, T., Vodenik, B., & Zorko B. (2020). Measurement uncertainty arising from sampling of environmental samples. *Appl Radiat Isot.* 2020 Feb;156:108978. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.108978> Epub 2019 Nov 9. PMID: 31770713.
6. Pernigotti, D., Gerboles, M., Belis, C., & Thunis, P. (2013). Model quality objectives based on measurement uncertainty. Part II: NO₂ and PM₁₀. *ATMOSPHERIC ENVIRONMENT*, 79, 869–878. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.045> JRC83406.
7. Слободян, Б. І., Гейченко, М. В., & Менасова, А. Ш. (2025). Практика застосування процедури забезпечення якості і контролю якості (QA/QC) при дорозвідці Полохівського родовища літію. *Мінеральні ресурси України*, (1), 33–40. <https://doi.org/10.31996/mru.2025.1.33-40>
8. George, A., & Usman, U. (2025). AI-Enabled safety and risk management in mining environments. Manuscript. ResearchGate. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/398512017_AI-Enabled_Safety_and_Risk_Management_in_Mining_Environments
9. Williams, D. E. (2019). Low Cost Sensor Networks; How Do We Know the Data are Reliable? *ACS sensors*. <https://doi.org/10.1021/acssensors.9b01455> Corpus ID: 201668778.
10. Lashko, Y., Sukach, S., Laktionov, I., Chencheva, O., Rieznik, D., & Kortsova, O. (2025). Predictive Mathematical and Computer Model for Determining Harmful Effects of Dust Pollution on the Environment and Workers. *Baltic Journal of Modern Computing*, 13(2), 436–452. <https://doi.org/10.22364/bjmc.2025.13.2.08>
11. On Approval of the Procedure for Determining the Values of Background Concentrations of Pollutants in the Atmospheric Air, Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine No. 286 (2021) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0700-01#Text>

Received (Надійшла) 21.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Лашко Євгеній Євгенович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна;
Yevhenii Lashko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Civil and Labour Safety, Geodesy and Land Management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine;
e-mail: evgeny.lashko.lj@gmail.com; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0001-9691-4648>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57203623830>.

**Metrological evaluation of the results of measurements
of sources of technogenic pollution at a mining enterprise**

Yevhenii Lashko

Abstract. Relevance. The mining industry is one of the most environmentally burdensome industries, whose activities are accompanied by the formation of significant amounts of dust, gaseous emissions, aerosols, and secondary pollution of territories. **Object of research:** mathematical model of metrological assessment of measurement results. **Purpose of the article.** Development of a scientifically sound approach to the metrological assessment of measurement results of sources of man-made pollution at mining enterprises, taking into account measurement uncertainty and factors influencing the production environment. **Research results.** The article discusses the issue of metrological support for measurements of sources of man-made pollution at mining enterprises. The necessity of using metrologically verified measurement methods to ensure the reliability of environmental monitoring results is substantiated. An approach to evaluating measurement results based on the analysis of errors, measurement uncertainty, and compliance of results with established regulatory requirements is proposed. A mathematical model for evaluating the total uncertainty of measurement results for pollutant concentrations in the air and on the surfaces of mining enterprises has been developed. **Conclusions.** The implementation of metrologically sound procedures increases the reliability of environmental assessment of anthropogenic impact and the effectiveness of environmental and industrial safety management. Scope of application of the obtained results: the results of measurements of pollutant concentrations form the basis for management decisions, the development of environmental protection measures, and the assessment of risks to personnel and the population.

Keywords: metrological support, standardization, man-made pollution, mining enterprise, measurement uncertainty, environmental monitoring, dust pollution.

Л. О. Левченко¹, Я. А. Підлісний², Б. В. Бурдейний¹, А. В. Карачун¹

¹ Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

² Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХИСНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Анотація. Досліджено застосування моделювання поширення електромагнітних полів надвисоких, ультрависоких і вищих частот для оптимізації захисних властивостей та розташування електромагнітних екранів. Проведено моделювання розподілу магнітного поля промислової частоти у тілі людини, вкритому захисним одягом. Встановлено, що за певних умов ущільнення магнітного потоку можливе підвищення рівня магнітного поля. Отримана модель, яка дозволяє проєктувати захисний одяг високої ефективності, на основі моделювання поширення магнітних полів електричних машин, надано рекомендації щодо розташування магнітних екранів потрібної ефективності. Показано, що за умови немонотонності зміни напруженості магнітного поля з відстанню від електричної машини, магнітний екран повинен розташовуватися як надалі від точок зміни напрямку вектора магнітного поля (точок нульового значення напруженості поля). Методом моделювання зміни напруженості техногенного та геомагнітного поля захисною феромагнітною конструкцією визначено межі максимально можливого екранування техногенного магнітного поля без зниження напруженості природного магнітного поля нижчої за нормативні значення. Показано, що моделювання поширення електромагнітних полів частот мобільного зв'язку доцільно використовувати не тільки для розроблення схем розташування базових станцій, а й для зниження рівнів випромінювання самих засобів зв'язку. Сигнали базових станцій навіть за забезпечення надійного зв'язку не повинні бути нижчі за $0,12-0,15$ мкВт/см². У цьому випадку випромінювальні властивості більшості мобільних телефонів залишаються на мінімальному рівні. В умовах переходу мобільного зв'язку на стандарт 5G відбувається підвищення гранично допустимих рівнів, що обумовлене збільшенням робочих частот обладнання та підвищенням згасання потужності з відстанню. У таких умовах частина будівель потребує додаткового екранування від електромагнітних впливів. Наголошено, що магнітні та електрофізичні властивості захисних матеріалів мають частотну залежність. Тому розрахункові результати разом з певними спрощеннями і припущеннями при здійсненні моделювання можуть давати певні похибки. З урахуванням цього у проєктні рішення доцільно закладати запас ефективності захисту людей та впливу на стабільність роботи обладнання.

Ключові слова: моделювання, електромагнітне поле, електромагнітний екран, оптимізація.

Вступ

Моделювання поширення електричних, магнітних та електромагнітних полів різних амплітудно-частотних характеристик є найбільш ефективним методом прогнозування електромагнітної обстановки на стадіях проєктування забудови, розміщення електротехнічного обладнання тощо. Це дозволяє оцінити вплив електромагнітних полів на населення і працюючих та забезпечити нормативні рівні електромагнітної сумісності електричних та електронних пристроїв.

У процесі моделювання завжди необхідно враховувати похибки обчислень внаслідок наявності певних припущень у математичних функціях, які описують закономірності розповсюдження електромагнітних полів у залежності від їх амплітудно-частотних характеристик. У багатьох випадках моделювання повинне враховувати наявність перешкод, наприклад, магнітних та електромагнітних екранів, стін будівель, зелених насаджень тощо. Але при цьому недостатньо уваги приділяється межах моделювання, тобто відстаням, на яких прогноуються напруженості полів, щільності потоків енергії. Формально електромагнітне поле розповсюджується на нескінченній відстані, тому доцільно визначити критерії просторових обмежень моделювання. Крім того, для електромагнітних полів різних частот та амплітуд існують гранично допустимі рівні впливу на біологічні об'єкти та електронні прилади. Коректне визначення таких критеріїв підвищить ефективність застосування моделювання поширення електромагнітних полів та знизить обсяги обчислень.

Стан питання

Існує багато досліджень щодо моделювання поширення електричних, магнітних та електромагнітних полів. З урахуванням практичних потреб найбільше уваги приділяється поширенню магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти та електромагнітних полів ультрависоких та надвисоких частот (усі види бездротового зв'язку). Дослідження [1] присвячено визначенню поширення магнітних та електричних полів високовольтних ліній електропередачі. Методологія такого моделювання добре опрацьована [2]. Але у деяких випадках структури магнітних полів досить складні. Це стосується електротехнічного обладнання, яке генерує кілька просторових гармонік магнітного поля [3]. У дослідженні [4] надано методологію моделювання поширення магнітних полів множинних джерел. Верифікація результатів моделювання свідчить про прийнятну збіжність теоретичних та експериментальних даних. Моделювання поширення електромагнітних полів ультрависоких та вищих частот здійснюється, виходячи з потужності випромінювачів або на основі їх технічних даних [5]. Закономірності поширення таких електромагнітних полів добре відомі і враховують навіть вплив відбиваючих поверхонь [6]. Діаграми спрямованості таких полів досить прості – сферична або опуклий тілесний кут. Але самі по собі моделі поширення електромагнітних полів можна застосувати тільки для визначення межі граничного допустимого рівня, напруженості поля або щільності потоку енергії. У багатьох випадках цього недостатньо. За високих

значень полів необхідно визначити найбільш оптимальні місця розташування і конфігурації захисних конструкцій – магнітних та електромагнітних екранів. Ця задача неоднозначна. Захисні властивості матеріалів залежать від амплітудно-частотних характеристик екранованих полів, що впливає з фундаментальних співвідношень електродинаміки суцільних середовищ. До того ж, сучасні композиційні матеріали для екранування електромагнітних полів з керованими коефіцієнтами екранування мають високу вартість через складність технології виготовлення [7]. Тому доцільно дослідити можливість оптимізації застосування та розташування захисних конструкцій для підвищення електромагнітної безпеки людей та забезпечення електромагнітної сумісності електричного та електронного обладнання.

Метою дослідження – застосування моделювання поширення електромагнітних полів для оптимізації захисних властивостей і розташування екрануючих конструкцій.

Викладення основного матеріалу

Методологічні підходи до моделювання низькочастотних та високочастотних електромагнітних полів відрізняються. У багатьох випадках для визначення поширення магнітного поля промислової частоти необхідно забезпечити високу точність, що обумовлене необхідністю його поширення у обмежених об'ємах на малих відстанях. Це проектування трансформаторів, високовольтних кабелів. Для такого моделювання здебільшого використовують засоби COMSOL. Моделювання поширення магнітного поля було застосовано для проектування захисного одягу, виготовленого з текстильного матеріалу, насиченого феромагнітними наночастинками. Випробування цього матеріалу у лабораторних умовах з використанням повіреного вимірювального обладнання та коректної методики показало, що він має великий коефіцієнт екранування магнітного поля промислової частоти і його можливо використовувати для виготовлення захисного одягу працівників, які обслуговують електротехнічне обладнання. При здійсненні моделювання вважалося, що усе тіло людини вкрите захисним матеріалом (рис. 1).

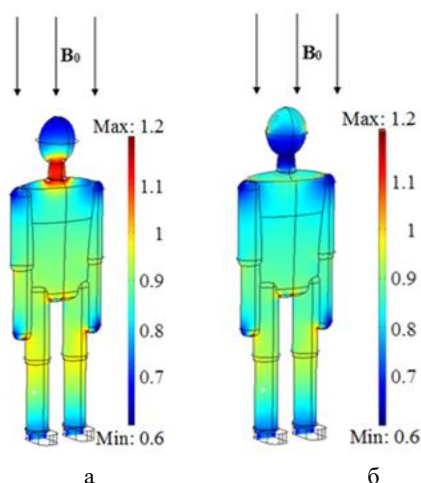


Рис. 1. Розподіл індукції магнітного поля у тілі людини, вкритої захисним матеріалом: а – людина повністю вкрита захисним матеріалом; б – захисний матеріал вкриває голову і спадає на плечі у вигляді накидки

Як видно з рис. 1, а, захисний шар в цілому екранує зовнішнє магнітне поле, але в області шиї індукція магнітного поля не знижується, а підвищується. Таке явище можна пояснити тим, що лінії магнітного поля, протікаючи феромагнітним шаром ущільнюються у області шиї. Тобто збільшується магнітний потік в усьому місці і поле проникає у внутрішній об'єм. Це неможливо виявити за використання стандартних методик визначення ефективності захисного одягу, які передбачають вимірювання у області голови, грудної клітки та паху. На рис. 1, б видно, що за розподілом магнітного потоку по більшій площі захисні властивості одягу підвищуються. Очевидно, що одночасне вимірювання значень полів у багатьох точках дуже складне, тому застосування моделювання поширення магнітного поля дозволяє досягти бажаного результату.

У [3] показано, що для чотирипольних електричних машин магнітне поле характеризується кількома просторовими гармоніками. Ці гармоніки мають різні закономірності зниження з відстанню, тому сумарне магнітне поле змінюється не монотонно: зниження магнітного поля досягає нульового значення, змінює напрям і знову підвищується за модулем. Моделювання поширення магнітного поля електричних машин здійснюється на основі розв'язку рівняння Гауса для скалярного потенціалу. З практики відомо, що критичними для інтегрального значення магнітного поля є дві просторові гармоніки. Для найбільш поширених чотирипольних машин це дипольна та квадрупольна гармоніки. Напруженість сумарного магнітного поля визначається з підсумкового співвідношення:

$$H = (R_0/R)^3 \times a_{11} \times \cos \phi \times \sin \theta + (R_0/R)^4 \times a_{22} \cos 2\phi \times \sin^2 \theta.$$

де R_0 – умовний радіус електричної машини, R – відстань до електричної машини, a_{11} , a_{22} – амплітудні значення дипольної та квадрупольної гармонік магнітного поля, ϕ , θ – кути полярних координат.

Було здійснено моделювання поширення магнітного поля для різних значень просторових гармонік магнітного поля біля корпусу електричної машини. Вважалося, що $R = 2k$ (рис. 2).

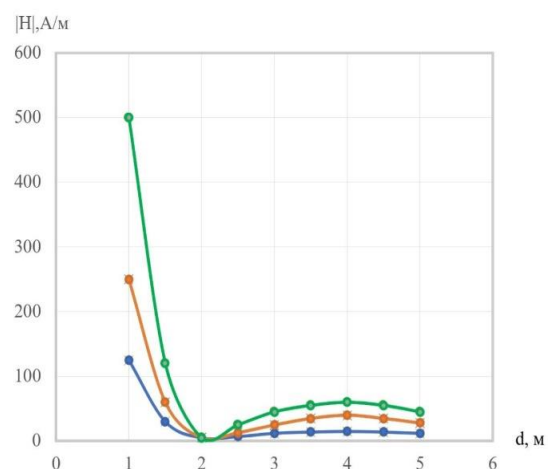


Рис. 2. Зміна модуля напруженості магнітного поля електричної машини з відстанню за різних значень дипольної та квадрупольної гармонік

мобільного інтернету тощо. У середньому різке підвищення випромінювання мобільних телефонів відбувається за сигналів базових станцій 0,08–0,12 мкВт/см². Іноді цей показник для окремих пристроїв застарілих моделей складає 0,2 мкВт/см². Тому при моделюванні інтенсивностей електромагнітних полів базових станцій мобільного зв'язку та визначення оптимального розташування випромінювачів слід керуватися мінімальним сигналом на рівні 0,12–0,15 мкВт/см². У зв'язку з поступовим переходом мобільного зв'язку на стандарт 5G постає проблема підвищення щільності встановлення базових станцій, що пов'язане з підвищенням робочої частоти або підвищення потужностей випромінювачів для забезпечення належного покриття. Більшість країн обрало останній шлях, обумовлений економічними міркуваннями. Тому, наприклад, у Німеччині гранично допустимий рівень щільності потоку енергії складає 450 Вт/см², в Україні – 100 мкВт/см². У таких умовах висувається вимога екранування деяких будівель для забезпечення умов перебування людей – закладів здоров'я та освіти. При цьому необхідно одночасно знизити рівні зовнішнього високочастотного електромагнітного поля та стабільний мобільний зв'язок.

Ефективність екранування електромагнітного поля можна характеризувати коефіцієнтом екранування, який показує, у скільки разів знизилась щільність потоку енергії або напруженість поля внаслідок застосування екранування. Цей показник також визначають у логарифмічних одиницях – децибелах. Для високочастотних випромінювань зазвичай використовують такий показник, як еквівалентна глибина проникнення поля у захисний матеріал, який показує товщину, за якої рівень електромагнітного поля знижується у e разів, (приблизно у 2,7 рази). Це пояснюється експоненціальним зниженням рівня поля у матеріалі:

$$\delta = \sqrt{1/(\pi f \mu \sigma)},$$

де δ – еквівалентна глибина проникнення поля, f – частота електромагнітного поля, μ – абсолютна магнітна проникність матеріалу, σ – питома електропровідність матеріалу.

Для оптимізації захисних властивостей електромагнітного екрана на основі моделювання поширення електромагнітного поля необхідно зв'язати фактичну потрібну товщину екрану з коефіцієнтом екранування $k = 8,686 \cdot d/\delta$, де d – товщина матеріалу, який забезпечує коефіцієнт екранування k . Це співвідношення виглядає емпіричним, але коефіцієнт 8,686 обумовлений переходом від натурального до десяткового логарифму при стандартному визначенні ефективності екранування ($20 \lg = 8,685$ дБ). Таким чином $k = 8,686d \sqrt{\pi f \mu \sigma} = 15,4d \sqrt{f \mu \sigma}$.

Для оптимізації коефіцієнта екранування достатньо обрати необхідну товщину матеріалу з відомими магнітними та електрофізичними властивостями. Слід враховувати, що магнітна проникність та

електрична провідність є комплексними величинами і мають частотну залежність. Ці показники для певних частот не завжди є довідковими даними навіть для стандартних металевих сплавів. Тому у практичній діяльності необхідно враховувати можливість виникнення деяких розбіжностей з експериментальними даними. Враховуючи, що при моделюванні поширення електромагнітних полів також використовується певні спрощення і припущення у проектні рішення необхідно закладати певний запас захисних властивостей екрануючих матеріалів і конструкцій.

Висновки

1. Показано, що моделювання поширення електромагнітних полів наднизьких та ультрависоких частот дозволяє прогнозувати необхідну ефективність засобів захисту. Застосування моделювання дозволяє визначити недоліки захисних конструкцій, що не можливо, із застосуванням стандартних методів.

2. Надано методики визначення структури магнітного поля електричних машин, що дозволило на основі моделювання поширення магнітного поля визначити оптимальні зони розташування магнітних екранів. Визначено межі застосування магнітних екранів для екранування магнітних полів промислової частоти з урахуванням одночасного екранування геомагнітного поля, межі зниження якого регламентовані відповідними нормативами.

3. Показано, що застосування моделювання поширення електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот дозволяє не тільки оптимізувати схему розташування базових станцій мобільного зв'язку, а й мінімізувати випромінювання мобільних телефонів за рахунок визначення мінімально допустимих рівнів сигналів базових станцій, які не призводять до підвищення випромінювання самих засобів зв'язку.

4. Надано зручний у використанні розрахунок, який дозволяє оптимізувати параметри конструкції для екранування високочастотних електромагнітних полів. Показано, що у проектні рішення необхідно закладати певний запас захисних властивостей через частотні залежності магнітних та електрофізичних властивостей захисних матеріалів та наявність певних спрощень і припущень, які закладаються у моделі поширення електромагнітних полів.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Левченко Л.О. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі. Системи обробки інформації. 2016. № 1. С. 29–37. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2016_1_9
2. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств. Техническая электродинамика. 2015. № 2. С. 3–15. URL: https://library.kpi.kharkov.ua/files/new_postupleniya/mulfmo.pdf

3. Levchenko, L., Ausheva, N., Karaieva, N., Glyva, V., & Burdeina, N. (2024). Modeling of the external magnetic field of electric machines. *Advanced Information Systems*, 8(1), 24–30. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.1.03>
4. Glyva, V., Murr, P., Biruk, Y., Dolia, O., & Levkivskyi, R. (2025). Modelling the propagation of magnetic fields from multiple diverse sources. *Advanced Information Systems*, 9(4), 5–10. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.4.01>
5. Khalifa T., Alnabi A. Electromagnetic Pollution Emitted from Base Station. *International Journal of Science and Research. Int. Journal of Science and Research*. 2015. Vol. 4. P. 1125–132. <https://www.ijsr.net/getabstract.php?paperid=SEP14708>
6. Ходаковський, О., Левченко, Л., Колумбет, В., Козачук, А. і Кужавський, Д. Розрахунковий апарат моделювання поширення електромагнітних полів різнорідних джерел. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. 5, 1 (Чер. 2021), С. 34–38. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.04>.
7. Tudose I.V., Mouratis K., Ionescu O.N., Romanitan C., Pachiou C., Popescu M., Khomenko V., Butenko O., Chernysh O., Kenanakis G., Barsukov V.Z., Suche M.P., Koudoumas E. Novel Water-Based Paints for Composite Materials Used in Electromagnetic Shielding Applications. *Nanomaterials*. 2022, 12(3). P. 487. <https://doi.org/10.3390/nano12030487>.
8. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Левин С.В. Дослідження явища ослаблення статичного геомагнітного поля сталевую колоною. *Технічна електродинаміка*. 2014. №1. С. 12–19. http://nbuv.gov.ua/UJRN/TED_2014_1_4

Received (Надійшла) 28.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Левченко Лариса Олексіївна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри цифрових технологій в енергетиці, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна;
Larysa Levchenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department Digital Technologies in Energy, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine;
e-mail: larlevch@ukr.net; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-7227-9472>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57194577942>.

Підлісний Ярослав Анатолійович – аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва і архітектури, м. 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, ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0008-4906-3164>.

Бурдейний Борис Владиславович – студент кафедри цифрових технологій в енергетиці, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна, м. Київ, Україна;
Borys Burdeinyi – student of Department Digital Technologies in Energy, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine;
e-mail: borysburdeyniy@gmail.com, ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0004-7055-3994>.

Карачун Анастасія Володимирівна – студентка кафедри цифрових технологій в енергетиці, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна, м. Київ, Україна;
Anastasiia Karachun – student of Department Digital Technologies in Energy, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine;
e-mail: anastasia.karachun7@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0006-6567-119X>.

Modelling the propagation of electromagnetic fields and optimising the effectiveness of protective structures

Larysa Levchenko, Yaroslav Pidlisnyi, Borys Burdeinyi, Anastasiia Karachun

Abstract. The application of modelling the propagation of extremely low, ultra-high and higher frequency electromagnetic fields for optimising the protective properties and location of electromagnetic screens has been investigated. Modelling of the distribution of the industrial frequency magnetic field in the human body covered with protective clothing has been carried out. It was established that under certain conditions of magnetic flux compression, an increase in the magnetic field level is possible. A model was obtained that allows the design of highly effective protective clothing based on the modelling of the propagation of magnetic fields of electrical machines, and recommendations were given on the location of magnetic screens of the required effectiveness. It has been shown that, given the non-monotonic change in magnetic field intensity with distance from the electric machine, the magnetic screen should be located as far as possible from the points of change in the direction of the magnetic field vector (points of zero field intensity). By modelling the change in the intensity of the man-made and geomagnetic fields by a protective ferromagnetic structure, the limits of the maximum possible shielding of the man-made magnetic field without reducing the intensity of the natural magnetic field below the normative values are determined. It has been shown that modelling the propagation of mobile communication frequency electromagnetic fields is useful not only for developing base station layout schemes, but also for reducing the radiation levels of the communication devices themselves. Even when ensuring reliable communication, base station signals should not be lower than 0.12–0.15 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. In this case, the radiation properties of most mobile phones remain at a minimum level. With the transition of mobile communications to the 5G standard, the maximum permissible levels are increasing, due to the increase in the operating frequencies of the equipment and the increase in power attenuation with distance. Under such conditions, some buildings require additional shielding from electromagnetic influences. An easy-to-use calculation is provided, which allows optimising the shielding coefficients of electromagnetic fields of certain frequencies while ensuring the protection of people and stable mobile communication. It is emphasised that the magnetic and electrophysical properties of protective materials are frequency-dependent. Therefore, the calculation results, together with certain simplifications and assumptions made during modelling, may give rise to certain errors. With this in mind, it is advisable to include a margin of safety for the protection of people and the stability of equipment operation in design solutions.

Keywords: modelling, electromagnetic field, electromagnetic screen, optimisation.

К. Д. Ніколаєв^{1,2}, А. С. Білик^{1,3}, К. М. Сапожников¹, О. О. Козлітін⁴

¹ Науково-дослідний інститут військової розвідки, Київ, Україна

² Міжрегіональна академія управління персоналом, Київ, Україна

³ Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

⁴ НУ «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна

АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ЗАСАД КЕРУВАННЯ ЗАХИСНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ

Анотація. Проаналізовано можливості розрахункового прогнозування електрофізичних властивостей композиційних матеріалів для екранування електромагнітних випромінювань. Показано, що електрофізичні властивості є основним показником ефективності екранування. Проаналізовано основні емпіричні співвідношення для розрахунку діелектричної та магнітної проникностей композицій, виходячи з показників матриці та наповнювача. Визначено роль коефіцієнта деполіризації частинок наповнювача несферичних форм. Показано, що визначення показників за об'ємним вмістом наповнювача складне у практичній діяльності. Тому доцільно проводити попередній перерахунок об'ємних параметрів у масові. Слід враховувати, що співвідношення Максвелла-Гарнета та Оделевського дають прийнятну похибку для об'ємного вмісту наповнювача до 0,3. При цьому співвідношення призначені для двокомпонентних композицій. Для об'ємного вмісту наповнювача більше 0,3 для визначення діелектричної проникності композицій доцільно використовувати співвідношення Бругемана. Перевагою цього співвідношення є придатність до проектування багатокомпонентних композиційних матеріалів. Усі наведені співвідношення дають коректні результати для наповнювачів мікророзмірів. У проектних необхідно враховувати можливе зменшення об'єму матриці у процесі полімеризації або висихання. Особливо це стосується водовмісних матеріалів. У цьому випадку знижується поріг протікання електричного струму (перколяційного ефекту), що впливає на коефіцієнт екранування. При перевищенні порогу протікання різко підвищується коефіцієнт відбиття, що у багатьох випадках, наприклад електромагнітного камуфляжу, є небажаним. Для визначення порогу протікання електричного струму слід використовувати фундаментальні співвідношення електродинаміки суцільних середовищ.

Ключові слова: електромагнітне випромінювання, екранування, електрофізичні властивості, композиційний матеріал.

Вступ

Електромагнітні екрани призначені, у першу чергу, для захисту людей від електромагнітних впливів. Крім того, вони призначені для забезпечення електромагнітної сумісності електронного обладнання. Досвід відбиття широкомасштабної збройної агресії проти України засвідчив, що ефективність сучасних бойових дій та, зокрема, розвідки критично залежить від зниження радіолокаційної та радіотехнічної помітності військових об'єктів. У сучасних умовах бойових дій надзвичайно актуальним є захист засобів розвідки, зв'язку та управління від впливу електромагнітних випромінювань. Ефективні екранувальні та поглинальні покриття дозволяють підвищити живучість апаратури, зменшити ймовірність її виявлення та забезпечити стабільну роботу радіоелектронних систем у складній електромагнітній обстановці.

Електромагнітні поля радіолокаційних станцій, засобів зв'язку та іншої апаратури створюють складну електромагнітну обстановку та впливають на роботу радіоелектронних засобів. Для зменшення радіолокаційної помітності об'єктів і підвищення заводостійкості використовуються поглинальні покриття різної будови, у тому числі багатопарові композити. До таких покриттів висуваються одночасно вимоги щодо широкосмугового поглинання, обмежених масогабаритних показників та технологічності виготовлення, що особливо важливо для військової техніки. Забезпечення цих вимог пов'язане з вибором складу та структури багатопарових композитів, для чого потрібні адекватні теоретичні моделі їх електрофізичних характеристик.

Існує багато емпіричних та напівемпіричних співвідношень для визначення магнітних та електрофізичних характеристик багатокомпонентних композицій. Але не завжди вони дають задовільний результат. Тому доцільно визначити межі їх придатності, що спростить процеси проектування матеріалів з потрібними захисними властивостями.

Огляд досліджень і розробок

Проектування композиційних матеріалів з потрібними коефіцієнтами екранування електромагнітних випромінювань є дуже складною задачею. Це пояснюється тим, що коефіцієнти відбиття та проходження електромагнітних хвиль залежать від діелектричної та магнітної проникностей і електропровідності. Ці показники, у свою чергу, залежать від показників окремих компонентів, композитів та їх об'ємних вмістів у кінцевому продукті. Експериментальний підбір цих співвідношень вимагає великих обсягів робіт та витрат часу і коштів. Тому доцільне попереднє оцінювання (прогнозування) ефективності з використанням певних математичних функцій та моделей. Тому цій проблематиці присвячено багато уваги.

У роботі [1, 2] розроблено теоретичні засади і верифіковано результати проектування неоднорідних захисних матеріалів. Але ці роботи стосуються неоднорідностей макророзмірів. З іншого боку, багато досліджень присвячено неоднорідним композиціям на основі наноструктур [3, 4]. Прогнозування ефективності таких структур для визначення коефіцієнтів екранування через визначення електрофізичних та магнітних властивостей практично неможливо, що обумовлено, у

тому числі, і квантовими ефектами. У дослідженнях [5, 6] показано, що визначити коефіцієнт екранування та внесок у нього відбиття електромагнітних хвиль можливо тільки експериментально, а математичний апарат використовується тільки для пояснення ефектів. Зокрема, визначається коефіцієнт відбиття за поверхневим імпедансом кінцевого продукту. В той же час дані робіт [7, 8] свідчать, що ефективність екранування як низькочастотних, так і високочастотних електромагнітних полів залежить від розмірів і форми частинок наповнювача у діелектричній матриці. Поодинокі дослідження, які аналізують співвідношення прогнозування електрофізичних та магнітних властивостей композитів [9, 10] тільки констатують даний факт можливості застосування для оціночного визначення ефективності матеріалів. Але порівняння експериментальних і розрахункових робіт і розрахункових даних свідчить, що у багатьох випадках збіжність незадовільна [11]. Тому актуальною задачею є оцінювання придатності та меж застосування співвідношень для визначення електрофізичних та магнітних властивостей композиційних матеріалів.

Метою статті є аналіз існуючих математичних моделей ефективної діелектричної і магнітної проникностей композитів та оцінка їх придатності для розрахунку захисних властивостей багатошарових композитів, призначених для екранування електромагнітних випромінювань у широкому діапазоні частот, з встановленням області коректного застосування.

Викладення основного матеріалу

Вибір конструкції одно- та багатошарового композиту потребує розуміння фізичних процесів, що протікають при взаємодії електромагнітної хвилі з матеріалом, та математичного апарату для розрахунку його магнітних та електрофізичних характеристик. Тому спочатку розглянемо основні механізми екранування та поглинання, а потім перейдемо до аналізу теоретичних моделей ефективної діелектричної проникності композитів.

Фізичні механізми екранування та поглинання. Поведінка електромагнітної хвилі при поширенні в шарі матеріалу визначається його хвильовим опором, діелектричною та магнітною проникністю. Хвильовий опір однорідного шару в наближенні плоскої хвилі при нормальному падінні на ізотропне середовище записують як:

$$Z = \sqrt{\mu/\varepsilon},$$

де Z дає нормований (безрозмірний) хвильовий опір; $Z_0 = 120\pi$ Ом – це опір вільного простору (має розмірність).

Справжній опір у Ом: $Z_{\text{фізичний}} = Z * Z_0$; ε – відносна діелектрична проникність; μ – відносна магнітна проникність.

Для нормального падіння плоскої хвилі чим ближче Z наближається до одиниці (узгодження з вільним простором), тим меншим є коефіцієнт відбиття хвилі на межі поділу середовищ.

Поглинання енергії хвилі в шарі зумовлене втратами в діелектричній підсистемі (провідність, поляризаційні та релаксаційні процеси) та в магнітній

підсистемі (гістерезис, вихрові струми, рух доменних стінок). У багатошарових структурах, де ε та μ змінюються від шару до шару, можна послідовно узгоджувати хвильовий опір і розподіляти поглинання енергії за товщиною покриття, що дає можливість отримати широкосмуговий захист. У загальному випадку для похилого падіння хвилі хвильовий опір залежить також від поляризації та кута падіння. Таким чином, саме керовані значення ε та μ у шарах композиції забезпечують можливість узгодження хвильового опору та досягнення заданого рівня поглинання.

Розрахунок товщини шару для інтерференційного узгодження. Оптимальну товщину однорідного шару для інтерференційного зменшення відбиття можна оцінити за умовою, що оптична товщина шару дорівнює чверті довжини хвилі в матеріалі:

$$d = \frac{c}{4f\sqrt{\varepsilon\mu}},$$

де d – товщина шару, м; c – швидкість світла у вакуумі, м/с; f – робоча частота, Гц (с^{-1}); ε – відносна діелектрична проникність матеріалу; μ – відносна магнітна проникність матеріалу.

Це співвідношення виводиться з принципу інтерференції хвиль на межах шару та справедливе для нормального падіння хвилі з нехтуванням дисперсією параметрів ε і μ у межах робочої смуги.

Ця залежність показує, що при збільшенні частоти f необхідна товщина d зменшується, що накладає технологічні обмеження на реалізацію поглинальних покриттів у міліметровому діапазоні. Для розширення робочої смуги доцільно переходити від однорідних шарів до багатошарових структурованих середовищ із градієнтним профілем ε та μ .

Розведення позначень для діелектричної проникності. У композитах розрізняють чотири типи діелектричної проникності:

ε – локальна діелектрична проникність конкретного матеріалу (однорідного шару або фази);

ε_d – діелектрична проникність матриці (суцільної основної фази композиту, наприклад полімеру або полімерної матриці);

ε_m – діелектрична проникність наповнювача (дисперсних частинок, які розташовані в матриці, наприклад оксидів металів або феритів);

ε_{ef} – ефективна діелектрична проникність композиту як цілого, розраховується за теоретичними моделями на основі ε_d , ε_m та концентрації наповнювача.

Аналогічно розрізняють μ_d (проникність матриці) та μ_m (проникність наповнювача), а також μ_{ef} (ефективна проникність композиту). Модель Максвелла–Гарнета визначає ε_{ef} через параметри складових фаз (матриці та наповнювача) та їх вміст у композиті. У подальшому v_m та v_k використовуються як еквівалентні позначення об'ємної концентрації наповнювача (частка від 0 до 1).

Модель Максвелла–Гарнета. Для композитів, що складаються з діелектричної матриці та дисперсних включень, ефективну діелектричну проникність ε_{ef} можна оцінити за моделлю Максвелла–Гарнета, яка базується на теорії ефективного середовища і

була запропонована для малих концентрацій сферичних частинок:

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_d \cdot \frac{2\varepsilon_d + \varepsilon_m + 2v_m(\varepsilon_m - \varepsilon_d)}{2\varepsilon_d + \varepsilon_m - v_m(\varepsilon_m - \varepsilon_d)},$$

де ε_{ef} – ефективна діелектрична проникність композиту; ε_d – діелектрична проникність матриці (суцільної фази, наприклад полімеру); ε_m – діелектрична проникність наповнювача (дисперсних частинок); v_m – об’ємна частка наповнювача в композиті.

Модель базується на розв’язанні рівня електростатики для ізольованої сферичної частини в однорідному полі з подальшим усередненням поля для об’ємного композиту. Модель добре описує системи з відносно малими концентраціями включень ($v_m < 0,3$) та сферичною формою частинок. Зі збільшенням v_m ефективна проникність ε_{ef} зростає і наближається до ε_m , що дозволяє зменшити необхідну товщину шару для досягнення заданого рівня поглинання.

Слід зазначити, що модель Максвелла–Гарнета та наведена нижче модель Оделевського належать до класу квазістатичних моделей ефективного середовища, які виведені в наближенні $\lambda \gg d$, де λ – довжина хвилі в матеріалі, d – характерний розмір частинок наповнювача. При переході до міліметрового діапазону ($f > 30$ ГГц), коли λ стає порівняною з розмірами неоднорідностей, ці моделі можуть потребувати корекції з урахуванням дисперсії та розсіяння на окремих частинках. У таких випадках доцільно застосовувати повні електродинамічні розрахунки або уточнені моделі, що враховують розсіяння, подібне до композиційного.

Модель Оделевського. Для врахування впливу форми частинок застосовують модель Оделевського, яка узагальнює підхід Максвелла–Гарнета на еліпсоїдальні включення довільної орієнтації:

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_d \cdot \frac{1 + 2Fv_k}{1 - Fv_k},$$

де ε_{ef} – ефективна діелектрична проникність композиту; ε_d – діелектрична проникність матриці; F – фактор форми частинок (безрозмірний параметр, що визначається співвідношенням півосей еліпсоїда); v_k – об’ємна концентрація включень.

Ця модель дає змогу враховувати анізотропію композиту, зумовлену орієнтацією частинок, і узгоджується з моделлю Максвелла–Гарнета при $F = 1$ (сферичні частинки). При $F = 1$ обидві моделі дають однакові результати для малих концентрацій. Для витягнутих частинок F може приймати значення від 0 до 1, що дає більшу гнучкість у описі композитів з анізотропним наповнювачем.

Порівняння математичних моделей. З метою визначення придатності наведених вище моделей для опису електрофізичних властивостей багатошарових композитів, призначених для екранування електромагнітних випромінювань у широкому діапазоні частот, проведено їх порівняння за показниками: основні параметри, які в них враховуються; врахування морфології частинок; складність розрахунків; точність для сферичних включень; точність для несферичних включень; практичне застосування. Результати порівняння наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння математичних моделей ефективної діелектричної проникності композитів

Характеристика	Модель Максвелла–Гарнета	Модель Оделевського
Основні параметри	$\varepsilon_d, \varepsilon_m, v_m$	$\varepsilon_d, \varepsilon_m, F, v_k$
Врахування морфології частинок	Ні (лише об’ємна частка)	Так (фактор форми F)
Складність розрахунків	Низька	Середня
Точність для сферичних включень	Висока ($v_m < 0,3$)	Висока
Точність для несферичних включень	Низька	Висока
Практичне застосування	Оцінювання ефективної проникнення композитів, як попередня оцінка у розробленій структур	Розрахунок параметрів композитів з рахунком форми частинок під час проектування структур

Як бачимо, порівняння математичних моделей ефективної діелектричної проникності показує, що модель Максвелла–Гарнета є придатною для швидких оцінок властивостей ізотропних композитів зі сферичними включеннями при помірних концентраціях. Модель Оделевського доцільно застосовувати для анізотропних композитів, у яких істотною є форма та орієнтація включень.

У наведених нижче прикладах використано модель Максвелла–Гарнета як базову та найпростішу для ізотропних композитів зі сферичними включеннями, що дозволяє наочно продемонструвати вплив концентрації наповнювача на ефективну діелектричну проникність.

Приклад 1. Розрахунок при вищій концентрації наповнювача. Розглянемо композит, у якому діелектрична матриця має проникність $\varepsilon_d = 2,5$, наповнювач (оксид металу) має проникність $\varepsilon_m = 15$, а об’ємна частка наповнювача становить $v_m = 0,2$ (20 % за

об’ємом). Згідно з моделлю Максвелла–Гарнета ефективна діелектрична проникність дорівнює:

$$\varepsilon_{ef} = 2,5 \cdot \frac{2 \cdot 2,5 + 15 + 2 \cdot 0,2(15 - 2,5)}{2 \cdot 2,5 + 15 - 0,2(15 - 2,5)} \approx 3,57.$$

Отримане значення $\varepsilon_{ef} \approx 3,57$ у 1,43 рази більше, ніж проникність матриці ($3,57 / 2,5 \approx 1,43$). Це означає, що шар такого композиту матиме більшу оптичну щільність і дозволяє зменшити його товщину при тій самій матеріальній інтенсивності покриття, що також забезпечує кращу узгодженість хвильового опору при фіксованій товщині. Такий підхід використовується при проектуванні багатошарових структур, коли кожен шар має задану товщину та попередньо розраховану концентрацію наповнювача.

Приклад 2. Розрахунок при нижчій концентрації наповнювача. Для порівняння розглянемо той самий тип композиту з меншою об’ємною часткою наповнювача $v_m = 0,1$ (10 % за об’ємом) при $\varepsilon_d = 2,5$ та $\varepsilon_m = 15$.

$$\text{Тоді } \varepsilon_{ef} = 2,5 \cdot \frac{2 \cdot 2,5 + 15 + 2 \cdot 0,1(15 - 2,5)}{2 \cdot 2,5 + 15 - 0,1(15 - 2,5)} \approx 3,0.$$

У цьому випадку ефективна проникність лише на 20 % більша за проникність матриці ($3,0 / 2,5 = 1,20$). Зменшення v_m з 0,2 до 0,1 приводить до помітного зменшення ε_{ef} , що важливо враховувати при синтезі багат шарових структур та виборі профілю проникності за товщиною. Цей приклад показує, як варіюванням концентрації наповнювача можна формувати градієнтні композити, у яких ε_{ef} змінюється в контрольованому діапазоні від шару до шару.

На основі наведених розрахунків стає зрозумілим принцип побудови градієнтних структур. Такі структури формуються як набір із 5–7 шарів, у яких концентрація наповнювача змінюється за заданим законом (лінійним або експоненціальним). Це забезпечує плавне узгодження хвильового опору на межі «повітря – покриття» та мінімізацію відбиття в широкій смузі частот, що є основним завданням при проектуванні сучасних засобів екранування. Слід враховувати, що наведені співвідношення оперують об'ємним містом наповнювача у діелектричній матриці. На практиці дотриматися потрібного співвідношення важко. Це пояснюється великою дисперсністю наповнювача у насипному вигляді. Тому для проектування матеріалу слід застосовувати перерахунок об'ємного місту наповнювача у масовий міст, наведений у [11]. Крім того, слід враховувати, що у процесі висушування або полімеризації композиції відбувається зміна об'єму матриці. При цьому у разі вмісту води або розчинника така зміна може бути критичною. У такому випадку поріг протікання електричного струму (перколяційний ефект) зміщується, що автоматично веде до підвищення коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль [12]. Цей ефект обумовлений фундаментальними співвідношеннями електродинаміки суцільних середовищ, тому вміст наповнювача слід визначати достатньо точно. В той же час розглянуті співвідношення мають прийнятну похибку для об'ємного вмісту наповнювача, меншого за 0,3. При більших вмістах доцільно застосовувати співвідношення Бругемана:

$$\sum_{i=1}^N g_{m_i} \frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_i}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_{eff}} = 0.$$

Його перевагою є прийнятна похибка до вмісту наповнювача у межах 0,3–0,7, що відповідає багатьом прикладним задачам. Перевагою формули є придатність для визначення діелектричної проникності багатоконпонентних систем. Слід враховувати, що усі параметри матеріалів, діелектрична та магнітна проникності, електропровідність є комплексними величинами і мають частотну залежність. Тому застосування

розглянутих співвідношень доцільно застосовувати для оціночного визначення ефективності екранування електромагнітних випромінювань. Для отримання матеріалу потрібної ефективності з малою похибкою проектування необхідні коректні дані щодо амплітудно-частотних характеристик електромагнітних полів та випромінювань, які потребують екранування.

Висновки

1. У результаті проведеного аналізу встановлено, що існуючі співвідношення для визначення електрофізичних параметрів композиційних матеріалів мають певні обмеження. Їх доцільно застосовувати для композиції з наповнювачами мікророзмірів. На конкретних прикладах показано можливість достатньо точного розрахування діелектричної проникності двокомпонентної композиції.

2. Недоліком співвідношень Максвелла-Гарнета та Оделевського є оперування об'ємними вмістами наповнювачів у діелектричних матрицях. Тому у практичній діяльності слід застосовувати перерахунок цього параметру у масовий вміст. Крім того, ці співвідношення мають прийнятну точність для об'ємного вмісту наповнювача до 0,3. Для більших вмістів наповнювачів слід використовувати співвідношення Бругемана. Його перевагою є придатність для визначення електрофізичних параметрів багатоконпонентних композицій.

3. У процесі оцінки електрофізичних характеристик композиційних матеріалів слід враховувати наявність порогу протікання (перколяційного ефекту) у композиціях з електропровідними наповнювачами. За певних концентрацій наповнювачів різко підвищується провідність матеріалів, що автоматично підвищує коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль, яке є небажаним. У цих випадках слід керуватися фундаментальними співвідношеннями електродинаміки суцільних середовищ. Для отримання мінімальних похибок розрахунків необхідно мати дані про амплітудно-частотні характеристики електромагнітних полів та випромінювань, які потребують екранування. Це обумовлене частотною залежністю магнітних та електрофізичних характеристик матеріалів.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Burdeina, N., Levchenko, L., Korduba, I., Shamanskiy, S., Biruk, Y., 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>
- Biruk, Y., & Klymchuk, A. (2024). Засади проектування неоднорідних електромагнітних екранів. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 3(77), 199–202. <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.3.199>
- C. Pu, J. Yang, S. Jin, Y. Zhou, W. Gong. (2025). Engineered Self-Blown Nonisocyanate Polyurethanes with Synchronously Enhanced Electromagnetic Interference Shielding and Dimensional Stability. *Applied Polymer Materials*, 7600-7611, <https://doi.org/10.1021/acsapm.5c012350000>

4. R. Sharma, D. Das, P. K. Dash, A. Acharya, K. Parashar, SKS Parashar. 2025. Electromagnetic interference shielding of Zn-50%-Al alloy-coated polypropylene flexible conducting film. *Intelligent Computing Techniques and Applications*, 4 p.
5. Fang, Fang & Carder, Damian & Rubanov, S. (2014). Investigations of near infrared reflective behaviour of TiO₂ nanopowders synthesized by arc discharge. *Optical Materials*. 36. 1260-1265. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2014.03.010>
6. Jianle Xu, Xiaosi Qi, Chengzhi Luo, Jie Qiao, Ren Xie, Yuan Sun, Wei Zhong, Qiang Fu and Chunxu Pan. Synthesis and enhanced microwave absorption properties: a strongly hydrogenated TiO₂ nanomaterial. *Nanotechnology* 28 425701, 2017, <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa81ba>
7. Касаткіна Н.В., Тихенко О.М., Панова О.В., Бірук Я.І. Підвищення ефективності композиційних електромагнітних екранів регулюванням морфології феромагнітного наповнювача. *Системи управління навігації та зв'язку*. 2020. Вип. № 3(61), С. 115–119. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.115>.
8. V. Glyva, L. Levchenko, N. Burdeina, T. Tkachenko, G. Twardowski, Y. Biruk, L. Zozulia. (2024). Innovative Means of Normalizing Physical Factors the Environment in the Processes of Reconstruction and Restoration Historical Heritage Objects. *International Journal of Conservation Science*. Vol. 15, Issue 3, pp. 1287-1302, DOI: <https://doi.org/10.36868/IJCS.2024.03.09>
9. Кочетов Г. М., Самченко Д. М., Ластівка О. В. (2023) Методологічні засади розроблення рідких сумішей для екранування електромагнітних полів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: ПНТУ, 2023. Т 2(72). С. 183-185. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.2.183>
10. Самченко Д.М., Тихенко О.М., Зозуля Л.А., Цибульник Н.Н. (2023) Проектування електромагнітних екранів гарантованої ефективності для галузей цивільної безпеки та електромагнітної сумісності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. – Полтава: ПНТУ, 2023. Т 3(73) – С. 167-170. – doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.167>
11. Glyva, V., Bakharev, V., Kasatkina, N., Levchenko, O., Levchenko, L., Burdeina, N., Guzii, S., Panova, O., Tykhenko, O., Biruk, Y. Design of liquid composite materials for shielding electromagnetic fields. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 3(6-111), pp. 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231479>
12. G. Krasnianskyi, V. Glyva, N. Burdeina, Y. Biruk, L. Levchenko, O. Tykhenko. 2024. Methodology For Designing Facing Building Materials with Electromagnetic Radiation Shielding Functions. *International journal of conservation science*. Vol. 15, Sp. Is. 1, 53-62. <https://doi.org/10.36868/IJCS.2024.S1.05>

Received (Надійшла) 14.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Ніколаєв Кирило Дмитрович – доктор наук з державного управління, канд. сільськогосп. наук, професор кафедри публічного адміністрування, Міжрегіональна академія управління персоналом, с.н.с. НДІ розвідки, Київ, Україна;

Kyrylo Nikolaiev – Doctor of Science in Public Administration, PhD (Agrarian Sciences), Professor of the Department of Public Administration, Interregional Academy of Personnel Management, Senior Researcher at the Defence Intelligence Research Institute, Kyiv, Ukraine;

e-mail: nikolaevkirill@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-0404-6113>;

Scopus Author ID <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=42762116000#>.

Білік Артем Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва та архітектури, Начальник науково-дослідної лабораторії Науково-дослідного інституту воєнної розвідки, м. Київ, Україна;

Artem Bilyk – Candidate of Technical Sciences, PhD, Associate Professor, Kyiv National University of construction and architecture, Head of the Scientific Research Laboratory in the Defence Intelligence Research Institute, Kyiv, Ukraine;

e-mail: artem.bilyk@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-9219-920X>.

Сапожников Костянтин Миколайович – начальник відділу, Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, Київ, Україна;

Kostiantyn Sapozhnykov – Head of Department, Defence Intelligence Research Institute;

e-mail: sapozhnykov_kos@meta.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-0259-3690>.

Козлітін Олексій Олександрович – старший викладач кафедри цивільної та промислової безпеки, НУ «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна;

Oleksii Kozlitin – Senior Lecturer, Department of Civil and Industrial Safety, Kyiv Aviation Institute, Kyiv, Ukraine;

e-mail: oleksii.kozlitin@npp.nau.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0001-5129-5369>.

Analysis of the theoretical basis for managing the protective properties of electromagnetic screens

Kyrylo Nikolaiev, Artem Bilyk, Kostiantyn Sapozhnykov, Oleksii Kozlitin

Abstract. The possibilities of calculating the electrophysical properties of composite materials for shielding electromagnetic radiation are analysed. It is shown that electrophysical properties are the main indicator of shielding efficiency. The main empirical relationships for calculating the dielectric and magnetic permeabilities of compositions based on the matrix and filler indicators are analysed. The role of the depolarisation coefficient of non-spherical filler particles is determined. It is shown that determining indicators based on the volume content of the filler is difficult in practice. Therefore, it is advisable to perform a preliminary conversion of volume parameters to mass parameters. It should be noted that the Maxwell-Garnet and Odelevsky relationships give an acceptable error for the volume content of the filler up to 0.3. For filler volume content greater than 0.3, it is advisable to use the Bruggeman ratio to determine the dielectric permeability of the composition. The advantage of this ratio is its suitability for designing multi-component composite materials. All of the above ratios give correct results for micro-sized fillers. In design, it is necessary to take into account the possible reduction in matrix volume during polymerisation or drying. This is especially true for water-containing materials. In this case, the threshold for electric current flow (percolation effect) is reduced, which affects the shielding coefficient. When the flow threshold is exceeded, the reflection coefficient increases sharply, which in many cases, such as electromagnetic camouflage, is undesirable. To determine the electric current leakage threshold, the fundamental relationships of the electrodynamics of continuous media should be used.

Keywords: electromagnetic radiation, shielding, electrophysical properties, composite material.

О. О. Ченчева, С. В. Сукач

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна

РИЗИК-ОРІЄНТОВАНА ОЦІНКА ПОЖЕЖНОЇ ТА ВИБУХОВОЇ НЕБЕЗПЕКИ ПОБУТОВИХ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРІВ У ЩІЛЬНІЙ МІСЬКІЙ ЗАБУДОВІ

Анотація. Актуальність. Актуальність дослідження зумовлена масовим використанням вуличних електрогенераторів в умовах енергетичної нестабільності та надзвичайних ситуацій, що супроводжується зростанням ризиків пожеж і вибухів у щільній міській забудові. Відсутність уніфікованих підходів до оцінювання рівнів пожежовибухонебезпеки таких установок ускладнює прогнозування наслідків і прийняття ефективних управлінських рішень. **Об'єкт дослідження:** процеси виникнення та розвитку пожежовибухонебезпечних ситуацій під час експлуатації вуличних електрогенераторів в умовах міського середовища та надзвичайних ситуацій. **Мета статті:** визначення та обґрунтування рівнів ризику пожежовибухонебезпеки вуличних електрогенераторів шляхом аналізу умов їх експлуатації та основних небезпечних факторів з метою підвищення безпеки населення й об'єктів інфраструктури. **Результати дослідження.** У статті проаналізовано пожежну та вибухову небезпеку побутових генераторів, розміщених у щільній міській забудові без спеціальних захисних конструкцій і в безпосередній близькості до будівель. Запропоновано інтегральну експрес-оцінку рівня ризику настання пожежі й вибуху на основі імовірності, наслідків, експозиції та температурного коефіцієнта навколишнього середовища. **Висновки.** Отримані результати забезпечують можливість швидкої оцінки умов експлуатації вуличних генераторів під час екстрених відключень електропостачання та своєчасного впровадження превентивних заходів з мінімізації ризиків. Отримані результати можуть бути використані для оперативної оцінки пожежної та вибухової небезпеки побутових генераторів у щільній міській забудові під час екстрених відключень електропостачання. Запропонована експрес-методика доцільна для практичного застосування органами цивільного захисту, експлуатаційними службами, суб'єктами господарювання та органами місцевого самоврядування з метою обґрунтування превентивних заходів, підвищення рівня безпеки населення і зменшення потенційних втрат.

Ключові слова: вуличні електрогенератори, пожежовибухонебезпека, рівень небезпеки, надзвичайні ситуації, безпека населення.

Вступ

Постановка проблеми. Тривалі відключення електроенергії зумовили масове використання автономних джерел живлення, насамперед бензинових і дизельних генераторів, у прибудинкових територіях житлової забудови. Це явище викликане об'єктивною потребою забезпечення базових умов життєдіяльності населення, проте супроводжується низкою системних проблем техногенного, екологічного, санітарного та соціального характеру. Стихійна експлуатація генераторів у безпосередній близькості до житлових будинків створює серйозні ризики для здоров'я населення. Викиди продуктів згоряння палива, зокрема чадного газу (СО), оксидів азоту та дрібнодисперсних частинок, у разі недостатньої вентиляції або неправильного розміщення обладнання можуть призводити до гострих отруєнь, загострення серцево-судинних і респіраторних захворювань, а в окремих випадках — до летальних наслідків.

Виникає проблема шумового навантаження. Більшість побутових генераторів не призначені для тривалої роботи в густонаселених районах і створюють рівень шуму, що перевищує допустимі санітарні норми. Це негативно впливає на психоемоційний стан мешканців, порушує сон, спричиняє конфлікти між сусідами та знижує загальний рівень комфортності проживання у міському середовищі.

Зберігання пального у неналежних умовах, використання саморобних подовжувачів, перевантаження електромереж і недотримання правил експлуатації генераторів значно збільшують імовірність виникнення пожеж, особливо у дворах багатоповерхових будинків, де евакуація у разі надзвичайної ситуації ускладнена. Крім того, відсутність чітких правил

розміщення та використання генераторів у житловій забудові, а також недостатній рівень поінформованості населення щодо безпечної експлуатації такого обладнання, призводять до стихійності та неконтрольованості цього процесу. У довгостроковій перспективі це формує додаткові загрози громадській безпеці та підсилює соціальну напругу в громадах.

Таким чином, проблема масового використання генераторів у прибудинкових територіях виходить за межі суто енергетичного питання і потребує комплексного підходу, що поєднує нормативне регулювання, інформаційно-просвітницьку роботу, розвиток безпечніших альтернативних джерел енергії та врахування принципів цивільної безпеки й сталого розвитку міського середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пожежна небезпека масового використання електрогенераторів у прибудинкових територіях суттєво посилюється через системне недотримання вимог чинних нормативних документів у сфері пожежної та техногенної безпеки, зокрема державних будівельних норм. Згідно з ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва», розміщення джерел підвищеної пожежної небезпеки повинно здійснюватися з дотриманням установлених протипожежних відстаней, а також із урахуванням класу вогнестійкості будівельних конструкцій і матеріалів [1]. Фактичне встановлення генераторів упритул до фасадів житлових будинків, господарських споруд, балконів, вікон та вентиляційних отворів суперечить цим вимогам і створює умови для швидкого поширення пожежі у разі займання [2]. Водночас відсутність стаціонарних або сертифікованих захисних корпусів (кожухів) для генераторів не відповідає принципам забезпечення пожежної безпеки, визначеним у ДБН В.1.1-7:2016, які передбачають

мінімізацію впливу джерел тепла, іскор та відкритих гарячих поверхонь на навколишнє середовище. Використання тимчасових укриттів із горючих матеріалів (деревина, полімери, плівка, тенти) фактично підвищує пожежне навантаження у дворовому просторі.

Крім того, відповідно до ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування і забудова територій», прибудинкові території житлової забудови мають забезпечувати безпечні умови проживання, у тому числі з урахуванням пожежних розривів, можливості під'їзду пожежної техніки та недопущення розміщення потенційно небезпечних об'єктів у місцях масового перебування людей [3]. Стихійне встановлення генераторів у дворах багатоквартирних будинків порушує ці вимоги та ускладнює доступ екстрених служб у разі виникнення пожежі [4]. Окрему загрозу становить можливість займання від сторонніх джерел запалювання, зокрема недопалків сигарет. В умовах зберігання пального, наявності парів бензину або дизельного пального та горючих матеріалів навіть незначне джерело вогню може спричинити загоряння, що суперечить загальним вимогам пожежної безпеки, визначеним Правилами пожежної безпеки в Україні та положенням ДБН В.1.1-7:2016 щодо недопущення відкритих джерел вогню поблизу пожежонебезпечних установок.

Додатковим фактором ризику є іскріння під час роботи та підключення електрогенераторів, що виникає внаслідок використання несертифікованих подовжувачів, перевантаження мережі або зношеного електрообладнання [5]. Такі умови суперечать вимогам безпечної експлуатації електроустановок і створюють реальну загрозу займання ізоляції, сухої рослинності або елементів благоустрою прибудинкових територій.

У сукупності зазначені порушення норм ДБН В.1.1-7:2016 та ДБН Б.2.2-12:2019 формують високий рівень пожежної небезпеки у житлових кварталах, що в умовах щільної забудови та обмежених шляхів евакуації може мати тяжкі наслідки для життя і здоров'я мешканців та потребує нормативного врегулювання і посиленого контролю з боку органів місцевої влади та служб цивільного захисту.

Метою роботи є визначення та обґрунтування рівнів ризику пожежо-вибухонебезпеки вуличних електрогенераторів шляхом аналізу умов їх експлуатації та основних небезпечних факторів з метою підвищення безпеки населення й об'єктів інфраструктури.

Основний матеріал

Оцінювання ризику ґрунтується на положеннях ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва», ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування і забудова територій» та Правилах пожежної безпеки в Україні, які передбачають ідентифікацію джерел пожежної небезпеки, оцінку умов їх розміщення та можливих наслідків. Методологічною основою обрано напівкількісний підхід відповідно до ISO 31000:2018 «Risk management – Guidelines» та ISO/IEC 31010:2009 «Risk management – Risk assessment techniques», що допускає використання бальних шкал за умов обмежених вихідних даних. Такий підхід забезпечує обґрунтоване ранжування ризиків і прийняття управлінських рішень щодо допустимості або заборони

експлуатації генераторів у житловій забудові. Запропоновано визначити інтегральний показник ризику, який враховує імовірність виникнення пожежі, рівень впливу людей, тяжкість можливих наслідків для населення, споруд і майна, а також враховувати температурний показник. Запропоновано визначити ризик пожежо-вибухонебезпеки побутових генераторів як добуток чотирьох складових:

$$R = P \times E \times C \times k_T, \quad (1)$$

де P – імовірність виникнення пожежі або вибуху; E – рівень впливу на людей і забудову; C – тяжкість можливих наслідків; k_T – коефіцієнт впливу температури оточуючого середовища.

Кожен показник оцінюється за бальною шкалою від 1 до 5, а температурний коефіцієнт є показником, що здатен підсилювати чи знижувати вплив виникнення негативної події та ризик її настання.

Розглянемо конкретний випадок розташування вуличних генераторів, рис. 1.



Рис. 1. Фото розташування генератора та вихідні умови для розрахунку та оцінки ризику

Вихідні умови для оцінки: дизельні і бензинові генератори розташовані на вулиці біля комерційних об'єктів у п'ятиповерховому будинку на вулиці з інтенсивним рухом людей. Спеціалізовані місця розташування не передбачено. Розташування у безпосередній близькості до об'єкту живлення на відстані до 1,5 м. Живлення відбувається з використанням незахищених побутових подовжувачів. Визначимо ризик виникнення пожежі та настання негативних наслідків для людей і майна в результаті роботи 4 таких генераторів в умовах зимових температур -17°C (табл. 1).

*Таблиця 1 – Оцінка імовірності (P)**

Фактор	Опис	Бал
Тип генератора	бензиновий / дизельний	3–4
Тривалість роботи	>6 год/добу	4
Наявність захисного корпусу	відсутній	5
Відстань до будівлі	2–3 м	5
Паливо поруч	зберігається і іншому місці	2
Електропідключення	подовжувачі, іскріння	4

* Для описаних умов: $P \approx 4$ бали (висока імовірність).

Для оцінки експозиції приймали до уваги поверховість будинку, середню кількість людей на вулиці, наявність вікон і балконів, що може привести до руйнування скління, тип забудови та наявні шляхи евакуації. Результати занесено у табл. 2.

Таблиця 2 – Оцінка експозиції (Е, середнє арифметичне)*

Параметр	Умови	Бал
Людність вулиці	людна, постійний рух	5
Тип забудови	багатоповерхова	5
Кількість поверхів	5 поверхів	4
Вентиляційні отвори	вікна, балкони поруч	5
Можливість евакуації	частково обмежена	3

*Е ≈ 4,4 бали (дуже високий рівень впливу).

3 метою оцінки потенційного впливу горіння і вибуху генератора на населення, будівлі та майно було виконано моделювання вибуху генератора потужністю 10 кВт з вмістом палива у ємності для палива на рівні ¼ від загального об'єму. Моделювання виконувалося у програмному продукті Aloha. Отримана температурна карта представлена на рис. 2.

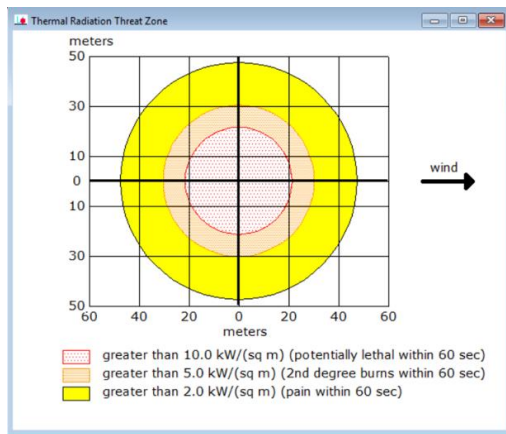


Рис. 2. Результати моделювання теплового шару вибуху вуличного енергатора у програмному продукті Aloha

З отриманих результатів видно, що тепла куля ураження розповсюджується до 40 м від місця вибуху, а на відстані до 20 м. можуть спостерігатися летальні наслідки для перехожих. Таким чином для оцінки наслідків було обрано фактори пожежного навантаження, потенційну можливість вибуху від потрапляння недопалків, іскріння, підпалу та ін., зону поширення вогню, ризик для людей та доступ рятувальних підрозділів (табл. 3).

Таблиця 3 – Оцінка наслідків (С, середнє арифметичне)*

Критерій	Потенційні наслідки	Бал
Пожежне навантаження	утеплювач фасаду, МАФи	4
Можливість вибуху	пари пального	4
Поширення вогню	вертикальне (фасад)	5
Ризик для людей	чисельне ураження	4
Доступ пожежних	доступний	2

*С = середнє арифметичне. С ≈ 3.8 бали (важкі наслідки).

Температура зовнішнього середовища суттєво впливає на рівень пожежо- та вибухонебезпеки вуличних генераторів. Підвищення температури повітря сприяє більш інтенсивному випаровуванню палива та мастильних матеріалів, підвищуючи концентрацію легкозаймистих парів, а також збільшує нагрів електричних та механічних компонентів, що підвищує ймовірність іскроутворення або перегріву. Низькі

температури можуть зменшувати випаровування палива, проте різкі коливання температури або контакт із джерелом іскри здатні спричинити займання. Тому при оцінюванні рівнів ризику пожежо- та вибухонебезпеки генераторів необхідно враховувати температурний коефіцієнт, який коригує ймовірність виникнення небезпечних ситуацій залежно від умов зовнішнього середовища. Температурний коефіцієнт та його значення було обрано на основі теплової теорії виникнення та поширення полум'я (табл. 4).

Таблиця 4 – Температурний коефіцієнт зовнішнього середовища

Темп., °C	Коеф. (k)	Темп., °C	Коеф. (k)
-20	0,7	20	1,1
-10	0,8	30	1,2
0	0,9	40	1,3
10	1,0		

Підставивши значення у формулу (1), отримаємо чисельний розрахунок інтегрального ризику:

$$R = 4 \times 4,3 \times 3,8 \times 0,8 \approx 53,5.$$

Скориставшись шкалою інтерпретації ризику (табл. 5), визначимо, що $R \approx 53,5 \rightarrow$ високий рівень ризику.

Таблиця 5 – Шкала інтерпретації ризику

Значення R	Рівень ризику	Рекомендації
до 20	низький	допустима експлуатація
21–40	помірний	додаткові заходи
41–70	високий	обмеження
>70	критичний	заборона/негайне усунення

Для мінімізації ризиків пожежої та вибухової безпеки побутових електрогенераторів доцільно забезпечувати безпечні відстані до будівель і горючих матеріалів, застосовувати вогнестійкі екрани, контролювати умови експлуатації за підвищених температур та дотримуватися вимог щодо зберігання пального і технічного обслуговування обладнання. Важливим є оснащення місць експлуатації первинними засобами пожежогасіння та підготовка користувачів до дій у разі надзвичайних ситуацій. Застосування інтегральної експрес-оцінки ризику дає змогу оперативно визначити рівень пожежої та вибухової безпеки з урахуванням ключових чинників, що особливо актуально в умовах екстрених відключень електропостачання. Перевагою методики є її простота, універсальність і придатність для обґрунтування превентивних заходів та пріоритетів реагування.

Висновки

У статті розглянуто актуальну проблему пожежої та вибухової безпеки побутових електрогенераторів, що експлуатуються в умовах щільної міської забудови без застосування спеціальних захисних або протипожежних конструкцій та розміщуються в безпосередній близькості до будівель і споруд. Встановлено, що такі умови експлуатації суттєво підвищують рівень ризику виникнення пожеж і вибухів, особливо під час екстрених відключень електропостачання та інтенсивного використання генераторів. Запропоно-

вано інтегральну експрес-оцінку рівня ризику настання пожежі та вибуху, що базується на комплексному врахуванні імовірності ініціювання небезпечної події, можливих наслідків, рівня експозиції об'єктів і людей, а також температурного коефіцієнта навколишнього середовища. Включення температурного чинника дало змогу більш точно відобразити вплив зовнішніх умов на пожежну безпеку генераторів.

Отримані результати свідчать про практичну доцільність використання запропонованої методики для швидкої оцінки умов експлуатації вуличних побутових генераторів у міському середовищі. Запропонований підхід може бути застосований для оперативного прийняття рішень, своєчасного реагування

та впровадження превентивних заходів, спрямованих на мінімізацію пожежних і вибухових ризиків та підвищення рівня безпеки населення й забудови в умовах надзвичайних ситуацій.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи..

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Mykhailova, A., Ballo, Y., Krykun, O., & Ponomarenko, R. (2025). Methodology for conducting fire research of the temperature regime of fire in generating station. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, vol. 2(20), pp. 62–72, doi: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2\(20\).62-72](https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2(20).62-72)
2. Farajirad, N., & Ensari Özay, M. (2025). Identification and simulation of fire and explosion hazards using HAZOP and ALOHA: Case study of the ignition system of a power plant. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, vol. 8(2), pp. 120–132, doi: <https://doi.org/10.34248/bsengineering.1629732>
3. Januszewski, J., & Brzezińska, D. (2021). RDF fire and explosion hazards at power plants. *Sustainability*, vol. 13(22), 12718, doi: <https://doi.org/10.3390/su132212718>
4. Semychayevskiy, S. V., & Neseniuk, L. P. (2024). On the research of the fire hazard of the technological process in machine rooms of nuclear and thermal power plants. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, vol. 6(1), pp. 213–219, doi: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/35>
5. Shekhar, R., Sundararajan, S., & Pham, H. (2018). Numerical investigation of transient low-power metal vapour discharges occurring in near-limit ignitions of flammable gas. *arXiv:1801.08384*, doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aaed04>

Received (Надійшла) 27.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Ченчева Ольга Олександрівна – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна; **Olha Chencheva** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Civil and Labour Safety, Geodesy and Land Management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyy National University, Kremenchuk, Ukraine; e-mail: chenchevaolga@gmail.com; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-5691-7884>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57203619235>.

Сукач Сергій Володимирович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна; **Serhii Sukach** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Civil and Labour Safety, Geodesy and Land Management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyy National University, Kremenchuk, Ukraine; e-mail: sergvs69@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-6834-0197>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202153691>.

Risk-oriented assessment of fire and explosion hazards of household electric generators in dense urban development

Olha Chencheva, Serhii Sukach

Abstract. The relevance of the study is driven by the widespread use of outdoor household electric generators under conditions of energy instability and emergency situations, which is accompanied by an increased risk of fires and explosions in densely built-up urban areas. The lack of unified approaches to assessing the level of fire and explosion hazards of such installations complicates the prediction of possible consequences and the adoption of effective management decisions. **Object of the study** is the processes of occurrence and development of fire- and explosion-hazardous situations during the operation of outdoor electric generators in an urban environment. **Purpose of the article** is to determine and substantiate the levels of fire and explosion risk of outdoor electric generators by analyzing their operating conditions and the main hazardous factors in order to improve the safety of the population and infrastructure facilities. **Research results.** The fire and explosion hazards of household electric generators located in dense urban development without special protective structures and in close proximity to buildings are analyzed. An integral rapid risk assessment of fire and explosion occurrence is proposed based on the evaluation of probability, potential consequences, exposure, and the ambient temperature coefficient. **Conclusions.** The obtained results enable a rapid assessment of operating conditions of outdoor electric generators during emergency power outages and support the timely implementation of preventive measures aimed at risk minimization. The proposed rapid assessment method can be applied by civil protection authorities, operating services, business entities, and local governments to enhance public safety and reduce potential losses.

Keywords: outdoor electric generators, fire and explosion hazard, hazard level, emergency situations, public safety.

Oleksandr Vasylychenko, Anton Poroshenko, Roman Yaroshevych, Vladislav Kholiev, Maksym Shostak
Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

MODEL FOR ORGANIZING HYBRID COMMUNICATION IN A MICROSERVICE ARCHITECTURE ON THE .NET PLATFORM

Abstract. Relevance. Modern microservice systems are widely used in high-load software products, particularly in cloud and enterprise environments, where performance, scalability, and reliability are critical requirements. The choice of interaction mechanisms between microservices significantly affects system behavior under load and its ability to handle peak request spikes. **Object of research.** The object of research is the interaction processes between microservices in distributed applications on the .NET platform. **Purpose of the article.** The purpose of the article is to analyze synchronous and asynchronous communication models, experimentally compare their performance under different load conditions, and substantiate a hybrid interaction model that combines the advantages of both approaches. **Research results.** Experimental performance testing of synchronous and asynchronous processing models was conducted. The results demonstrate that asynchronous interaction provides better scalability and resilience under high load, while the synchronous model is more effective for moderate traffic and low-latency scenarios. A hybrid model is proposed that dynamically selects the interaction type based on an integral load assessment. **Conclusions.** It is concluded that the use of a hybrid model enables stable and efficient operation of microservice systems by adaptively switching between synchronous and asynchronous processing depending on the current system state.

Keywords: microservice architecture, .NET, synchronous interaction, asynchronous interaction, performance, hybrid model.

Introduction

Current State. Modern distributed systems are increasingly used in large software products with high requirements for performance, scalability, and reliability. Microservice architecture enables flexible decomposition of monolithic applications into independent services, which simplifies the development, updating, and deployment of individual components. However, as such systems evolve, their structure becomes more complex and the volume of load increases, which intensifies the problem of choosing an correct method of interaction between services. An incorrect decision regarding the use of synchronous or asynchronous communication mechanisms, as well as coordination approaches, can lead to increased latency, the emergence of bottlenecks, and difficulties in system maintenance.

Modern microservice systems are widely used in high-load software products, particularly in cloud and enterprise environments, where scalability, fault tolerance, and predictable performance are key requirements. In the practice of designing such systems, the primary focus is placed not only on functional decomposition but also on the choice of interaction mechanisms between services, which significantly affects system behavior underload [1]. In most modern implementations, both synchronous and asynchronous communication mechanisms are used. Synchronous interaction, typically implemented through HTTP calls, remains dominant for latency-sensitive operations due to its simplicity of implementation and transparency of request processing. At the same time, practical experience in operating large-scale microservice systems shows that as load increases, synchronous calls become a source of blocking and cascading failures, which limits system scalability [2].

Asynchronous approaches based on message exchange and event-driven architecture are increasingly applied to the processing of bulk and background operations. They allow load leveling, reduce coupling between services, and improve resilience to peak request spikes. At the same time, extensive use of asynchronous interaction complicates system logic, requires additional infrastructure, and increases the requirements for monitoring, error handling, and ensuring idempotency [3]. In the .NET ecosystem, these trade-offs are particularly pronounced, as the platform is actively used to build both high-performance APIs and distributed services with complex business logic. Practical guidelines for developing .NET microservices usually recommend fixing the interaction model at the design stage; however, such an approach does not account for the dynamic nature of load in real-world systems [4].

Problem Statement. The objective of this work is to study and improve approaches to organizing microservice applications on the .NET platform. The study is aimed at identifying correct interaction strategies with consideration of the specifics of the .NET environment, experimentally comparing synchronous and asynchronous models under different load conditions, and substantiating a hybrid model in which both approaches are combined to achieve stable and efficient system operation. This will enable developers to obtain recommendations for the design, implementation, and scaling of microservice systems that meet modern requirements for performance, reliability, and efficiency.

Main Section

Study of Interaction Methods for Microservice Applications. The way in which microservices interact

with each other directly affects the performance, scalability, and reliability of the system [5]. The choice of message exchange approach determines how flexibly the system responds to peak loads, how quickly it can recover from failures, and how easily it can adapt to new requirements.

Synchronous communication has several advantages. It is characterized by straightforward integration with existing .NET frameworks such as ASP.NET, which simplifies the development and maintenance of services. In addition, the client receives a response immediately after the request is processed, which significantly simplifies further handling of the results. At the same time, this approach also has a few drawbacks. Synchronous interaction directly depends on the availability of the target service: if it is unavailable, request execution is blocked, which can lead to failure of the entire business process. Synchronous calls also limit scalability, since many concurrent requests can overload the service and significantly degrade performance. Moreover, in the case of long-running operations, the overall response time increases. To implement synchronous interaction in C#, HTTP/REST APIs using HttpClient or gRPC technology are typically used; the latter provides high-performance remote procedure calls based on the HTTP protocol [6].

Asynchronous message delivery allows a client to send a request without the need to wait for an immediate response, since requests and the results of their processing proceed independently of each other [7]. This approach ensures scalability by enabling the system to efficiently handle a significantly larger number of requests without the risk of overloading individual services. It also improves reliability, as the client does not depend on the immediate availability of a service, and reduces user-perceived latency, allowing the user to continue working without waiting for the operation to be completed. However, asynchronous interaction complicates implementation, requires additional mechanisms for handling responses and

tracking request states, makes debugging more difficult due to the distributed nature of data flows, and also necessitates the implementation of idempotency to avoid duplicate operations when messages are resent. In C#, asynchronous scenarios are implemented using message queues, including Azure Service Bus, RabbitMQ, or Apache Kafka, as well as through event-driven architecture, where events serve as triggers for subsequent actions across different services.

During the study, a performance comparison of synchronous and asynchronous request processing models was conducted based on two different approaches. The synchronous model was implemented using the HttpClient class, which is the traditional method for performing HTTP requests in C#. At the same time, the asynchronous model was based on message exchange using RabbitMQ.

Testing was carried out under two different scenarios:

1. Dependence of execution time on the total number of requests.
2. Dependence of execution time on the number of requests per thread.

The first scenario (Fig. 1) demonstrated a clear difference between the two approaches. For the synchronous model, the execution time initially increased linearly with the growth in the number of requests. However, after reaching a critical threshold of 10^4 requests, the system exhausted its capacity, and the increase in execution time became exponential. This behavior is typical for synchronous execution, where threads are blocked while waiting for responses.

The asynchronous model demonstrated significantly more stable results. An increase in the number of requests led to linear growth in execution time, while the system efficiently handled even high loads without substantial delays. This can be explained by the capabilities of asynchronous processing, where tasks are executed in parallel and resources are used correctly through RabbitMQ queues.

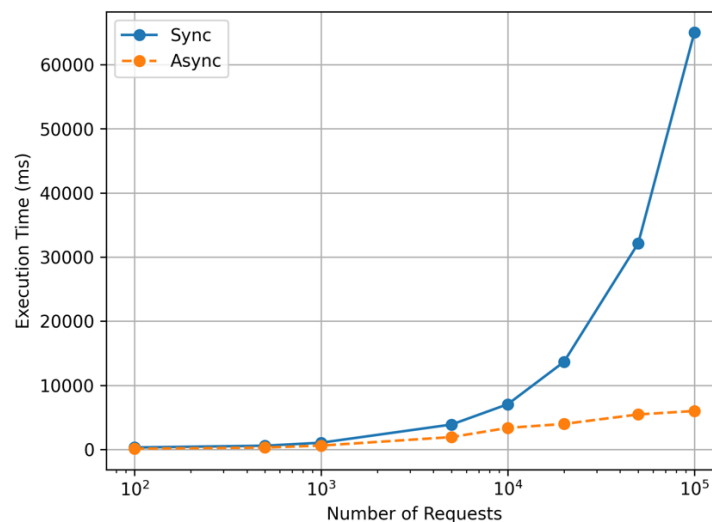


Fig. 1. Results of the first test

The second scenario (Fig. 2), which examined the impact of requests per thread, also confirmed the

advantage of the asynchronous model. In the synchronous model, execution time began to increase

significantly even at moderate values such as 25/2000. Further increases in the requests per thread resulted in overload and a substantial rise in execution time.

The asynchronous model coped with such load more effectively. Although execution time gradually

increased, it remained significantly lower compared to the synchronous model. Only at very high levels, such as 75/1000 or 100/1000, did a gradual increase in execution time begin to appear, indicating that the system was approaching its performance limit.

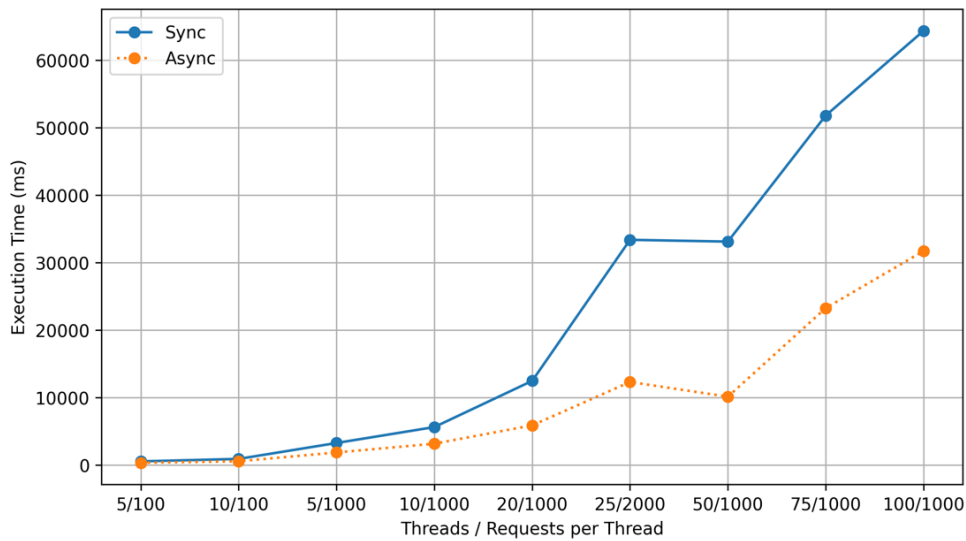


Fig. 2. Results of the second test

The results obtained demonstrate the advantage of the asynchronous message-passing model for processing many requests. The asynchronous approach enables more efficient use of system resources through parallel processing and message queues, whereas the synchronous model quickly reaches its performance limits. At the same time, the use of asynchronous communication is associated with the need to maintain additional infrastructure, including message brokers, and with increased operational costs in cloud environments, where charges are applied based on the number of processed messages and the volume of traffic. This confirms that neither a purely synchronous nor a purely asynchronous model is a universal solution [8].

Hybrid Model of Interaction Between Microservices. Considering the obtained results, a need arises to formulate a hybrid model of interaction between microservices that combines the advantages of both models. The idea is that the system does not fix the interaction type in advance but dynamically chooses between synchronous and asynchronous communication depending on the current load, latency requirements, and economic constraints. For example, during periods of low load, requests can be processed synchronously, which ensures minimal response time and does not require intensive use of brokers. During peak activity, part of the operations is shifted to the asynchronous mode, which helps avoid service overload and level the load on the infrastructure. Fig. 3 presents a conceptual diagram of the hybrid interaction model, which reflects the sequence of request processing in a microservice system. An incoming request is sent to the decision-making module, which determines the interaction mode based on operational metrics received from the monitoring module. Depending on the current load, either the synchronous or asynchronous mode is selected, after which the request is

forwarded to the corresponding microservices. The processing result is produced by the microservices and returned to the client as a response.

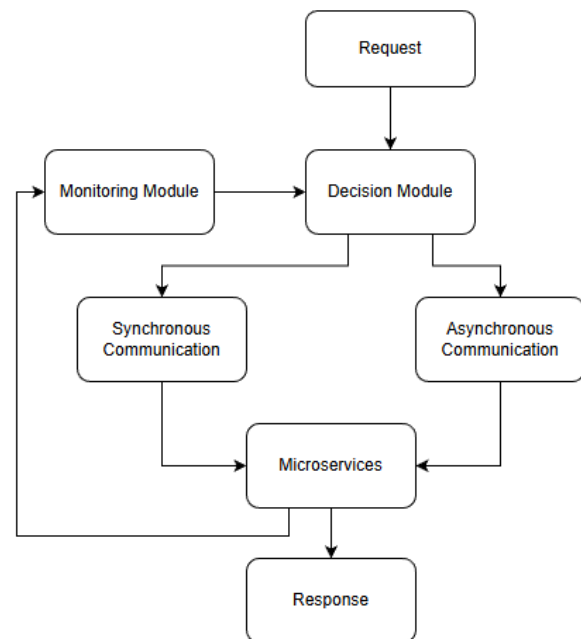


Fig. 3. Conceptual diagram of the hybrid model

To build the hybrid model, a set of parameters is used that quantitatively characterize the load and reflect the current state of the system. These parameters include the incoming request rate (RPS), the average service response time, and CPU utilization. Each of them has defined threshold values that specify the limits of stable operation. If the parameter values exceed these thresholds, the system approaches a degradation state, and under such conditions it is appropriate to switch to

the asynchronous processing model. Operation within the lower thresholds, on the contrary, ensures the effectiveness of synchronous interaction.

To generalize these criteria, an integral load assessment is used:

$$L = \alpha \cdot \frac{RPS}{R_{high}} + \beta \cdot \frac{T_{resp}}{T_{high}} + \gamma \cdot \frac{CPU_{util}}{CPU_{high}},$$

where the coefficients α , β and γ determine the weight of each parameter. The obtained value allows decisions to be made in a unified manner:

$$\begin{aligned} \text{sync: } L &< 1, \\ \text{async: } L &\geq 1. \end{aligned}$$

This approach makes it possible to evaluate the load comprehensively and ensures more stable and predictable switching between the sync and async modes. Several implementation options for the hybrid model in a microservice system on the .NET platform can be distinguished:

- hybrid at the API Gateway level. Incoming requests arrive at the gateway, where the decision-making module is implemented.
- hybrid at the individual service level. The entry service always accepts the request synchronously, but different processing paths are used inside it.
- hybrid at the individual operation level. For each endpoint or business action, an important class is defined: latency-critical, cost-sensitive, background processing, and so on.

Unlike classical approaches, where the choice of synchronous or asynchronous communication is made at the design stage and remains unchanged during operation, this model treats the interaction type as a dynamic parameter that changes over time.

Conclusions

This paper considered two main approaches to interaction between microservices: synchronous and asynchronous. It was shown that the synchronous model is simpler to understand and implement and is well suited for scenarios with moderate load and strict response-time requirements. In contrast, the asynchronous model performs better under high-load conditions, providing improved scalability and resilience to peak request spikes. Experimental results confirmed that as the request volume increases, synchronous interaction quickly reaches its limits due to the blocking nature of processing, whereas the asynchronous model allows more uniform utilization of system resources. At the same time, it was established that pervasive use of asynchronous interaction leads to increased system complexity and higher operational costs associated with maintaining additional message-exchange infrastructure, especially in cloud environments with pay-per-use pricing.

Based on these findings, it was concluded that neither a purely synchronous nor a purely asynchronous approach is universal. The application of a hybrid model is therefore appropriate, in which the interaction type is selected depending on the current load and economic constraints. In simpler and less loaded scenarios, the system may predominantly use synchronous interaction, while upon reaching critical load or latency thresholds, part of the operations can be shifted to the asynchronous mode, thereby leveling the load on the infrastructure.

Within the scope of this work, the hybrid model is described at a conceptual level without proceeding to full implementation. The metrics used and the operating principles of the decision-making module serve as a basis for further practical research and testing of dynamic selection between synchronous and asynchronous interaction modes. Thus, the following results were obtained in this article:

1. A review of synchronous and asynchronous interaction models in .NET microservice systems was conducted, and their advantages, disadvantages, and conditions for effective application were analyzed.
2. Experimental performance testing of both models was carried out under two load regimes, and the results demonstrated differences in scalability and system behavior under high incoming request intensity and multithreading.
3. A conceptual hybrid interaction model was proposed, in which the request processing type is determined based on an integral load assessment. This approach provides more stable switching between synchronous and asynchronous processing and improves overall system efficiency.

Future research in the field of microservice interaction may focus on further elaboration of the practical aspects of implementing the proposed approach, including the development of a full-featured prototype and its integration into a .NET microservice environment. Particular attention may be given to extended load testing and analysis of model behavior under various traffic types, service configurations, and scaling scenarios, which will make it possible to assess the robustness and applicability of the model in real-world systems.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

REFERENCE

1. Newman S. Building Microservices. O'Reilly Media, Incorporated, 2015. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/building-microservices/9781491950340>
2. Evaluating the monolithic and the microservice architecture pattern to deploy web applications in the cloud / M. Villamizar et al. 2015 10th Computing Colombian Conference (10CCC), Bogota, Colombia, 21–25 September 2015. 2015. URL: <https://doi.org/10.1109/columbiancc.2015.7333476>

3. Microservices: Yesterday, Today, and Tomorrow / N. Dragoni et al. *Present and Ulterior Software Engineering*. Cham, 2017. P. 195–216. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-67425-4_12
4. Pahl C. Containerization and the PaaS Cloud. *IEEE Cloud Computing*. 2015. Vol. 2, no. 3. P. 24–31. URL: <https://doi.org/10.1109/mcc.2015.51>
5. Pincioli R., Aleti A., Trubiani C. Performance Modeling and Analysis of Design Patterns for Microservice Systems. *2023 IEEE 20th International Conference on Software Architecture (ICSA)*, L'Aquila, Italy, 13–17 March 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/icsa56044.2023.00012>
6. Microservices: Migration of a Mission Critical System / M. Mazzara et al. *IEEE Transactions on Services Computing*. 2018. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tsc.2018.2889087>
7. Gordesli M., Varol A. Comparing Interservice Communications of Microservices for E-Commerce Industry. *2022 10th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS)*, Istanbul, Turkey, 6–7 June 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/isdfs55398.2022.9800784>
8. Analyzing Microservices and Monolithic Systems: Key Factors in Architecture, Development, and Operations / J. Christian et al. *2023 6th International Conference of Computer and Informatics Engineering*, Lombok, Indonesia, 14–15 September. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/ic2ie60547.2023.10331155>

Received (Надійшла) 18.12.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Васильченко Олександр Сергійович – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Vasylychenko Oleksandr – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics Kharkiv, Ukraine;

e-mail: oleksandr.vasylychenko@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0007-9265-7825>.

Порошенко Антон Ігорович – доктор філософії, старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Anton Poroshenko – PhD, Senior Lecturer, Department of Electronic Computing Machines, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: anton.poroshenko@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-7266-4269>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57250025600>.

Ярошевич Роман Олександрович – доктор філософії, старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Roman Yaroshevych – PhD, Senior Lecturer, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: roman.yaroshevych@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-7949-1513>;

Scopus Author ID <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58624172500>.

Холєв Владислав Олександрович – доктор філософії, асистент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Vladyslav Kholiev – PhD, Assistant Professor, Department of Electronic Computing Machines, National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: vladyslav.kholiev@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-9148-1561>;

Scopus Author ID <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57224189723>.

Шостак Максим Віталійович – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Maksym Shostak – PhD student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: maksym.shostak@nure.ua; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0003-1510-7425>.

Модель організації гібридної комунікації в мікросервісній архітектурі на платформі .NET

О. С. Васильченко, А. І. Порошенко, Р. О. Ярошевич, В. О. Холєв, М. В. Шостак

Анотація. Актуальність. Сучасні мікросервісні системи широко використовуються у високонавантажених програмних продуктах, зокрема в хмарних та корпоративних середовищах, де ключовими вимогами є продуктивність, масштабованість і надійність. Вибір способу взаємодії між мікросервісами істотно впливає на поведінку системи під навантаженням і її здатність протистояти піковим сплескам запитів. **Об'єкт дослідження.** Об'єктом дослідження є процеси взаємодії між мікросервісами у розподілених додатках на платформі .NET. **Мета статті.** Метою статті є аналіз синхронних та асинхронних моделей комунікації, експериментальне порівняння їх продуктивності за різних режимів навантаження та обґрунтування гібридної моделі взаємодії, що поєднує переваги обох підходів. **Результати дослідження.** Проведено експериментальне тестування синхронної та асинхронної моделей обробки запитів, яке показало кращу масштабованість і стійкість асинхронної взаємодії за високих навантажень та ефективність синхронної моделі за помірного трафіку. Запропоновано гібридну модель, що динамічно обирає тип взаємодії на основі інтегральної оцінки навантаження. **Висновки.** Зроблено висновок, що застосування гібридної моделі дозволяє забезпечити стабільну та ефективну роботу мікросервісних систем шляхом адаптивного перемикавання між синхронною та асинхронною обробкою залежно від поточного стану системи.

Ключові слова: мікросервісна архітектура, .NET, синхронна взаємодія, асинхронна взаємодія, продуктивність, гібридна модель.

Vasyl Vasiuta, Maksym Bedryk, Viktoriia Vasiuta

National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine

QUADROPTER HARDWARE AND SOFTWARE DEVELOPMENT

Abstract. Relevance. Over time, people have come to realize the potential of drones not only in the military but also in civilian industries. Their functionality is constantly expanding, and they are becoming a key tool in various areas of society. Currently, quadcopters are used to monitor the condition of forests, detect forest fires, control the operation of pipelines or power lines, and deliver goods to hard-to-reach areas. They open up new horizons and contribute to the development of various industries, providing effective solutions for various tasks and challenges. Currently, there is a wide variety of quadcopters from different manufacturers, but the price of most is too high. **Object of research:** quadcopter hardware and software. **The purpose of the study** is to create a fairly cheap solution using Arduino. **Research results.** Current models of drones can be varied in design - from simple to foldable, which opens up wide possibilities for expanding their functionality depending on their purpose. This study proposes to use the Arduino microcontroller to create a quadcopter. The authors describe in detail the components selected for its construction, the main stages of design and testing.. **Conclusions.** Without a pilot on board, unmanned aerial vehicles can be more efficient and cost effective than manned aircraft. This approach reduces the weight and size of drones, expands their capabilities, and provides greater autonomy in operation. In other words, unmanned aerial vehicles have the potential to improve efficiency and reduce costs compared to manned aircraft due to the absence of a person on board. Developing software and hardware for a quadcopter requires interdisciplinary knowledge in electronics, programming and aviation mechanics. Thanks to modern open platforms and availability of components, creating a quadcopter is becoming a reality not only for engineers, but also for enthusiasts. This approach opens up wide opportunities for experimentation, research and innovation in the field of unmanned aerial vehicles. Drones are an important tool that is rapidly gaining popularity and opening up new possibilities in various fields, from entertainment and scientific research to commercial applications.

Key words: quadcopter, hardware, microcontroller, software.

Introduction

As a result of technological progress, quadcopters are becoming increasingly popular and accessible to a wide range of users [1]. Technologies for using drones in various areas of life are developing, including aerial photography, monitoring forest resources, precision farming, environmental monitoring, and search and rescue operations. It is important that the development of unmanned aerial vehicles occurs in the absence of common standards and requirements for their design. This leads to a variety of drone characteristics determined by their size, functionality, flight range, takeoff type, specialization, and other parameters. Currently, there is a wide variety of quadcopters from different manufacturers, but the price of most is too high. **The purpose of the study** is to create a fairly cheap solution using Arduino.

Without a pilot on board, unmanned aerial vehicles can be more efficient and cost effective than manned aircraft. This approach reduces the weight and size of drones, expands their capabilities, and provides greater autonomy in operation. In other words, unmanned aerial vehicles have the potential to improve efficiency and reduce costs compared to manned aircraft due to the absence of a person on board [1].

Analysis of recent research and publications.

Information about software and technical means of controlling drones is in most cases presented on the websites of manufacturers, there are scientific publications that present a comparison of the characteristics of various means [2–7]. Yes, Kucherenko E.I. and I.A. Vakalyuk [8] analyzed the key components of the UAV, including autopilots, 16 hardware and software control platforms, sensors, interfaces and

control systems. They compared the functionality of the platforms and found a lack of documentation on the energy consumption of the equipment.

Presentation of the main material

Current models of drones can be varied in design - from simple to foldable, which opens up wide possibilities for expanding their functionality depending on their purpose. Regardless of what internal components the drone (multicopter) uses, the main elements remain unchanged. The drone consists of such parts as a frame, a flight controller, an engine, a battery, a communication controller and sensors. These elements work efficiently to ensure stable flow, save energy and transmit data. The frame determines the shape and structure of the drone, the flight controller handles it with arms, the motors provide traction, the battery powers all systems, the communication controller ensures communication with the operator, and the sensors provide information about the environment for the drone. Autonomous Poliotu ta Vikonannya Zavdan.

This study for the quadcopter design includes an Arduino Nano 3.0 software microcontroller, an NRF24L01+PA+LNA radio frequency module, a piezoelectric beep speaker, a 3D analog stick, and the Race model's motors. Spec 2205 KV2300 and Gamefan Flash 7040 propellers for them. A Brushless 40A speed regulator controller and a self-propelled battery type 3s on 21700 Samsung 40A batteries have been installed. The equipment includes a self-propelled remote control. All these components are mounted on the frame of the Mark 4 HD model.

More details about the components:

1. Arduino Nano is a fully functional miniature device based on the Atmega328 (for Arduino Nano 3.0)

or Atmega168 (for Arduino Nano 2.x) microcontroller, specially adapted for development boards. In terms of its functionality, the device is similar to the Arduino Duemilanove, but differs in its dimensions, the variety of power connectors and the use of a different type of USB cable (Mini-B). Arduino Nano has been developed and manufactured by Gravitech [3].

2. The NRF24L01+PA+LNA droneless module with an antenna operates at a frequency of 2.4 GHz and supports transmission speeds of up to 2 Mbit/s. The radio channel on these radio modules can exchange information with the recipient directly. Radio reduction can be combined with several devices based on nRF24L01+ or NRF24LE1. The droneless module can be used at distances up to 1000 meters [9].

Batteries. As a rule, they are composed of one or more elements, such as lithium-polymer or lithium-ion batteries, and cause the shell to be wrapped in plastic or other insulating material [9].

Quadcopters often use lithium polymer (LiPo) batteries. The stench is known for its high energy density, lightness and high tension and is ideal for unmanned aircraft such as quadcopters, the fragments provide high tension with a small vase that allows the devices to sit in the wind for a long time. LiPo batteries may also be used with other types of batteries, such as Li-ion, Nickel Metal Hydride (NiMH) and others, depending on the needs of a particular quadcopter. та його застосуван. In order to power motors with power requirements greater than 25 amperes, it was decided to create a battery based on three high-current lithium batteries Samsung INR21700 40T type 21700, as well as vikoristati BMS controller for charging.

3. Race Spec 2205 KV2300 motors are one of the popular motors that are used in many quadcopters, drones, and racing drones. They are strong, fluid and maneuverable, and are ideal for racing drones and other fixed-wing drones that require high fluidity and maneuverability.

4. Brushless 40A motor speed controller, often also called ESC (Electronic Speed Controller), is an electronic device that controls the speed of the brushless motor in quadcopters, car models, aircraft and other models. RC controls.

5. Gamefan Flash 7040 is a propeller that is widely used in quadcopters and other models with RC controls, especially in racing drones and freestyle quadcopters. According to him, the Gamefan Flash 7040 propeller is a popular choice among quadcopter pilots who are looking for high speed and efficiency in their flights, especially in racing and freestyle. Its characteristics allow you to achieve optimal results in different minds.

6. Piezoelectric sound speaker - sometimes also called simply "piezodynamic" - this is a type of speaker that uses a piezoelectric effect to create sound. Piezoelectric materials, such as quartz, resonate when an electric field is applied and produce sound sounds. In contrast to traditional speakers, which rely on the electromagnetic field to control the diaphragm, piezoelectric speakers operate without magnets or mechanical parts.

7. 3D analog stick - a camera element that is ideally used in a remote control for playing quadcopters, video games, as well as for various other devices that require precision and analog keruvannya. Zagalom, 3D analogue sticks are important components for precision and analogue recording in various devices and applications. All these components (Fig. 1) were selected by us through their versatility and brightness. The Arduino communication controller itself through its versatility, openness and ease of adjustment.



Fig. 1. Components assembled for a quadcopter

The quadcopter consists of two pairs of rotors and screws, arranged around a square frame. You can perform a vertical landing and landing, similar to normal guntocryls. However, the control system between gyrocopters and quadcopters is completely differentiated from one to the other through the dynamics of the field. Vikorist is given a coordinate system as a base for the quadcopter, the motors are arranged in the "x" configuration (Fig. 2).

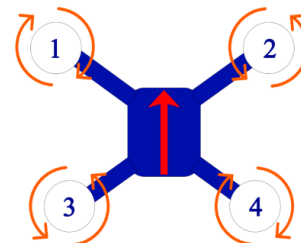


Fig. 2. Quadcopter warehouse

This means that at the tops of the square frame there are two motors that wrap around the year arrow, and two that wrap against the year arrow.

The flow of the space is ensured by the change of the end force and the moment on the skin axes. To ensure correct torque and force changes in the system, motors are installed and configured to operate in pairs, as shown in Table 1. Motors 1, 2, 3 and 4 are designated Motor 1, Motor 2, Motor 3 and Motor 4.

For translational movement of the quadcopter, it is necessary to tilt the platform in coordination with the desired axis. The tilt angle of the quadcopter is determined by the roll, pitch and yaw conditions of movement in three dimensions (3D), as shown in Fig. 3. Based on the location of the motors described in table 1, it is necessary to simply change the speed of movement of one of the pairs of motors in order to move in space. This allows the quadcopter to move in three dimensions and control it using only four inputs.

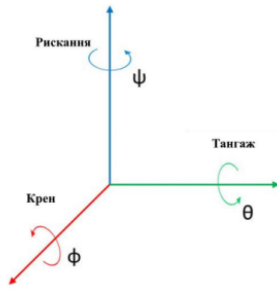


Fig. 3. Designation for movement in 3D

Table 1 – Paired operation of engines

	Gas				roll				pitch				yaw			
Motors	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4

Considering the control efficiency and the need to ensure sufficient flight time, it is important to choose the right battery for the quadcopter. A 3S battery has a voltage of 11.1 V (3 cells of 3.7 V each). The task is to calculate the flight time of a quadcopter with such a battery and a known current consumption.

Input data:

- Battery capacity $C=4000\text{mAh}$.
- Battery voltage $V=11.1\text{V}$.
- Maximum current consumption $I=25\text{A}$.

Flight time calculation:

1. Let's convert the battery capacity into ampere-hours (Ah):

$$C=4000\text{mAh}/1000=4\text{Ah}.$$

2. Let's calculate the flight time using the battery capacity and maximum current consumption:

$$\text{Flight time (hours)}=C/I=4\text{Ah}/25\text{A}=0.16 \text{ hours}.$$

3. Convert flight time into minutes:

$$0.16 \text{ hours} \times 60 \text{ minutes / hours} = 9.6.$$

So, at maximum power, the quadcopter will fly for approximately 9.6 minutes on a 3S battery with a capacity of 4000 mAh and a maximum current consumption of 25 A. First, the control system was assembled. For ease of installation, everything that was needed was placed on a breadboard, as shown in Fig. 4.

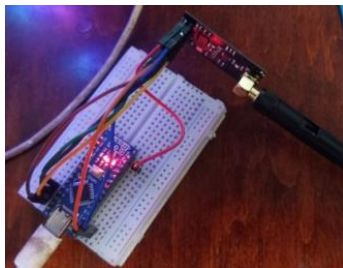


Fig. 4. Example of assembled components on a prototyping board

Next, the control panel was assembled. (Fig. 5). The microcontroller firmware was written using the

Arduino integrated development environment. For the correct operation of the program and code, libraries such as Servo and nRF24L01 were used.

The appearance of the quadcopter and the remote control is shown in Fig. 6.

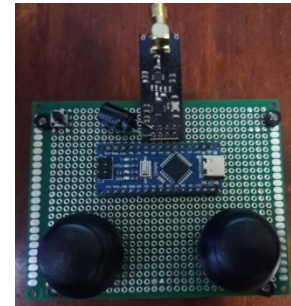


Fig. 5. Example of an assembled remote control on a prototyping board



Fig.6. Quadcopter and remote control

The final stage involved tests in a controlled environment. Flight log files were analyzed, PID parameters were adjusted, stability and response to control were checked. Changes were made to the code or hardware.

Conclusions

Drones are an important tool that is rapidly gaining popularity and opening up new possibilities in various fields, from entertainment and scientific research to commercial applications. Developing software and hardware for a quadcopter requires interdisciplinary knowledge in electronics, programming and aviation mechanics. Thanks to modern open platforms and availability of components, creating a quadcopter is becoming a reality not only for engineers, but also for enthusiasts. This approach opens up wide opportunities for experimentation, research and innovation in the field of unmanned aerial vehicles.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

REFERENCES

1. Drone technology uses and applications for commercial, industrial and military drones in 2020 and the future. [Electronic resource]. URL: <https://www.businessinsider.com/drone-technology-uses-applications>

2. Chengqi X., Cen Q., Yan Z. Design and research of human-computer interaction interface in autopilot system of aircrafts. *2009 IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design*. 2009. С. 1498–1501. URL: <https://doi.org/10.1109/CAIDCD.2009.5374997>.
3. D. Perezetal. A ground control station for a multi-UAV surveillance system: design and validation in field experiments. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2013. т. 69. С. 119–130. URL: <https://doi.org/10.1007/s10846-012-9759-5>.
4. L. Meier et al. PIXHAWK: A system for autonomous flight using onboard computer vision. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Shanghai, China, 9–13 May 2011. 2011. Pp. 2992–2997. URL: <https://doi.org/10.1109/icra.2011.5980229>.
5. Gabriel D. L., Meyer J., du Plessis F. Brushless DC motor characterisation and selection for a fixed wing UAV. *AFRICON 2011*, Victoria Falls, Livingstone, Zambia, 13–15 sept. 2011 p. 2011. URL: <https://doi.org/10.1109/afrcon.2011.6072087>.
6. E. Baskaya et al. Flexible open architecture for UASs integration into the airspace: Paparazzi autopilot system. *2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, Sacramento, CA, USA, 25–29 sept. 2016. 2016. URL: <https://doi.org/10.1109/dasc.2016.7778016>.
7. J. L. Sanchez-Lopez et al. AEROSTACK: An architecture and open-source software framework for aerial robotics. *2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Arlington, VA, 7–10 June 2016. 2016. URL: <https://doi.org/10.1109/icuas.2016.7502591>.
8. Кучеренко О. І., Вакалюк Т. А. Огляд технічних та програмних засобів керування БПЛА. *Вісник ХНТУ* № 2, 2024. С.170-176. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.24>
9. Arduino.ua [Electronic resource]. URL: <https://arduino.ua/?search=Nano+V3.0+-+2015>

Received (Надійшла) 18.12.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Васюта Василь Васильович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем, Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка", Полтава, Україна;
Vasyl Vasiuta – 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: Vasuta_V_V@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-6209-1129>.

Бедрик Максим Олегович – студент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем, Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка", Полтава, Україна;
Maksym Bedryk – student, Department of Computer and Information Technologies and systems, National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine;
e-mail: Va12356@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0004-0379-8561>.

Васюта Вікторія Борисівна – кандидат технічних наук, доцентка, доцентка кафедри економіки, підприємництва та маркетингу, Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка", Полтава, Україна;
Viktoriia Vasiuta – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economics, Entrepreneurship and Marketing, National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine;
e-mail: Vasuta_V_B@meta.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-7469-3968>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57215410301>.

Розробка програмно-апаратного забезпечення квадрокоптера

В. В. Васюта, М. О. Бедрик, В. Б. Васюта

Анотація. Актуальність. З плином часу люди стали усвідомлювати потенціал безпілотних літальних апаратів не лише у військовій сфері, а й у цивільних галузях. Їх функціональні можливості постійно розширюються, і вони стають ключовим інструментом у різних сферах суспільства. Наразі квадрокоптери використовуються для моніторингу стану лісів, виявлення лісових пожеж, контролю за роботою трубопроводів або електроліній, а також для доставки товарів у важкодоступні райони. Вони відкривають нові горизонти і сприяють розвитку різних галузей, надаючи ефективні рішення для різноманітних завдань і викликів. На даний час є велике різноманіття квадрокоптерів від різних виробників, але ціна у більшості зависока. **Об'єкт дослідження:** програмно-апаратне забезпечення квадрокоптера. **Метою дослідження** є створення достатньо дешевого рішення, використовуючи Arduino. **Результати дослідження.** Сучасні моделі дронів можуть бути різними за конструкцією – від простих до складних, що відкриває широкі можливості для розширення їхнього функціоналу в залежності від призначення. В даному дослідженні для створення квадрокоптера пропонується використати програмний мікроконтролер Arduino. Автори детально описують компоненти, обрані для його побудови, основні етапи проектування та тестування. **Висновки.** В умовах відсутності пілота на борту безпілотні літальні апарати можуть бути більш ефективними та вигідними, ніж пілотовані літальні апарати. Такий підхід дозволяє зменшити вагу та габарити дронів, розширити їх можливості та забезпечити більшу автономність у роботі. Безпілотні літальні апарати мають потенціал для покращення ефективності та зниження витрат у порівнянні з пілотованими літальними апаратами завдяки відсутності людини на борту. Розробка програмно-апаратного забезпечення квадрокоптера вимагає міждисциплінарних знань в електроніці, програмуванні та авіаційній механіці. Завдяки сучасним відкритим платформам та доступності компонентів, створення власного квадрокоптера стає реальністю не лише для інженерів, а й для ентузіастів. Такий підхід відкриває широкі можливості для експериментів, досліджень та інновацій у сфері безпілотних літальних апаратів. Безпілотні апарати є важливим інструментом, який швидко набирає популярність та відкриває нові можливості у різних сферах, починаючи від розваг та наукових досліджень і закінчуючи комерційними застосуваннями.

Ключові слова: квадрокоптер, апаратне забезпечення, мікроконтролер, програмне забезпечення.

О. М. Воронець, В. М. Воронець, П. Є. Пустовойтов

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

САМООРГАНІЗОВАНА МАРШРУТИЗАЦІЯ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ З УРАХУВАННЯМ ВТРАТ ВУЗЛІВ

Анотація. Актуальність. У сучасних телекомунікаційних мережах із динамічною топологією, відсутністю фіксованої інфраструктури та обмеженими ресурсами вузлів особливо актуальним є завдання побудови ефективних децентралізованих методів маршрутизації. Традиційні протоколи, що спираються на глобальну інформацію або централізоване управління, виявляються малостійкими до втрат вузлів і змін мережевої структури, що зумовлює необхідність розробки самоорганізованих моделей із локальним прийняттям рішень. **Об’єкт дослідження:** процеси маршрутизації трафіку в децентралізованих телекомунікаційних мережах. **Мета статті:** розробка та дослідження математичної моделі самоорганізованої маршрутизації, що забезпечує формування ефективних маршрутних структур на основі локальної взаємодії вузлів без централізованого управління та зберігає зв’язність мережі за умов динамічної зміни топології. **Результати дослідження.** У статті запропоновано модель децентралізованої маршрутизації, яка базується на ітеративному оновленні локальних маршрутних ваг у вузлах мережі з урахуванням просторової близькості та напрямкової узгодженості. Проведено аналітичний спектральний аналіз інтегрального рівняння оновлення ваг, що дозволив виявити домінуючі просторово-напрямкові моди, які визначають стійкі маршрутизовані структури. Результати імітаційного моделювання підтвердили здатність системи до самоорганізації, адаптації до втрати вузлів і автоматичної перебудови маршрутів без використання глобальної інформації про мережу. **Висновки.** Запропонована самоорганізована модель маршрутизації характеризується локальністю, адаптивністю та стійкістю до топологічних змін і збоїв. На відміну від традиційних протоколів маршрутизації, вона не потребує централізованого управління або глобального оновлення маршрутних таблиць, що зменшує обчислювальні витрати та підвищує масштабованість. Сфера використання отриманих результатів: безпроводні сенсорні мережі, мобільні Ad-hoc мережі, інфраструктури Інтернету речей та інші децентралізовані телекомунікаційні системи з динамічним навантаженням і обмеженими ресурсами вузлів.

Ключові слова: телекомунікаційна мережа, маршрутизація, математична модель, управління трафіком, вузли мережі, безпроводні сенсорні мережі.

Вступ

Постановка проблеми. У сучасних телекомунікаційних мережах, що характеризуються зростаючою складністю, динамічністю топології та відсутністю фіксованої інфраструктури, особливо актуальним стає питання побудови ефективних децентралізованих методів маршрутизації. Традиційні підходи, що базуються на централізованому оновленні таблиць маршрутів або потребують повного знання структури мережі, виявляють обмежену гнучкість і недостатню стійкість до втрат елементів. Особливо це стосується безпроводних сенсорних систем, мобільних Ad-hoc мереж та IoT-інфраструктур, де мережеві вузли можуть бути енергозалежними, рухомими або тимчасово недоступними.

У таких умовах особливу цінність мають моделі, які забезпечують локальне прийняття рішень та мають здатність до самоорганізації. Ці підходи дозволяють кожному вузлу діяти автономно, спираючись лише на інформацію від найближчих сусідів, що суттєво підвищує масштабованість і надійність мережі. Ідея полягає у створенні механізму, за якого маршрути формуються не заздалегідь, а як результат динамічної взаємодії між вузлами. У результаті така система природно адаптується до змін топології, змін навантаження або втрати частини структури без необхідності централізованої реконфігурації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У процесі дослідження проблеми побудови ефективних методів маршрутизації в телекомунікаційних мережах важливо враховувати сучасні наукові

підходи, які відображають світовий рівень розвитку цієї галузі.

Останні роки було опубліковано низку праць, що пропонують нові рішення для безпроводних сенсорних систем, мобільних Ad-hoc мереж, мереж Інтернету речей та 5G-інфраструктур. Огляд сучасної літератури дозволяє проаналізувати основні тенденції, виявити переваги та обмеження існуючих моделей і визначити напрями, у яких запропонована модель самоорганізованої маршрутизації може бути найбільш ефективною.

У роботі [1] запропоновано самоорганізовану мережу та метод маршрутизації для моніторингу стану залізничних тунелів. Перевагою є балансування енергоспоживання та автоматичне формування кластерів, що подовжує тривалість роботи мережі. Однак, метод орієнтований на лінійну топологію, що обмежує його застосування в інших сценаріях.

Дослідження [2] представляє адаптивний, безпечний та ефективний протокол маршрутизації для мобільних Ad-hoc мереж (MANET). Перевагою є інтеграція механізмів автентифікації, шифрування та виявлення вторгнень для забезпечення безпеки. Проте, складність реалізації та обчислювальні витрати можуть бути високими для обмежених ресурсами пристроїв.

У статті [3] проведено огляд протоколів маршрутизації для мобільного Інтернету речей (IoT), зокрема аналізується протокол RPL. Виявлено проблеми RPL при мобільності вузлів та розглянуто рішення для їх подолання. Перевагою є детальний аналіз існуючих підходів, але відсутні експериментальні результати.

тати для підтвердження ефективності запропонованих рішень.

У роботі [4] запропоновано стимулюючий децентралізований підхід до маршрутизації в мережах. Підхід спрямований на покращення продуктивності мережі шляхом наближення до системного оптимуму. Проте, необхідність стимулювання учасників може ускладнювати практичну реалізацію.

Стаття [5] представляє вдосконалення протоколів маршрутизації. Перевагою є підвищена стійкість до атак та збоїв, особливо в умовах перевантаження. Однак, інтеграція таких технологій може призвести до збільшення затримок та витрат ресурсів.

У дослідженні [6] розроблено енергоефективний кластерний протокол маршрутизації для бездротових сенсорних мереж, що поєднує алгоритми штучного бджолиного рою та мурашиної колонії. Перевагою є зменшення енергоспоживання та подовження тривалості роботи мережі. Проте, складність алгоритму може обмежувати його застосування в реальних умовах.

Робота [7] пропонує інтелектуальний протокол маршрутизації WOAD3QN-RP для бездротових сенсорних мереж, що інтегрує алгоритми рою та глибокого підкріплювального навчання. Перевагою є покращена адаптивність та ефективність маршрутизації. Однак, потреба у значних обчислювальних ресурсах може бути недоліком для пристроїв з обмеженими можливостями.

У статті [8] представлено покращений гібридний протокол маршрутизації (EHRP) для MANET, що поєднує протоколи OLSR, AOMDV та AODV. Перевагою є адаптація до змін мережевих умов та покращена продуктивність. Проте, складність інтеграції кількох протоколів може ускладнювати реалізацію та налаштування.

Дослідження [9] пропонує безпечний та енергоефективний підхід до маршрутизації в IoT, використовуючи покращену нечітку логіку типу 2, оптимізовану алгоритмом пошуку рептилій. Перевагою є баланс між безпекою та енергоефективністю. Однак, складність алгоритму може вимагати значних обчислювальних ресурсів.

У роботі [10] представлено покращений протокол маршрутизації для 5G mesh-мереж, що забезпечує ефективне та надійне встановлення шляхів між вузлами. Перевагою є децентралізований процес маршрутизації, що зменшує навантаження на мережу. Проте, ефективність протоколу може знижуватися в умовах високої мобільності вузлів.

Аналіз сучасних джерел показав, що більшість існуючих підходів орієнтовані на підвищення безпеки, енергоефективності та адаптивності, проте часто мають високу складність реалізації або залежать від глобальної інформації про мережу. Це підкреслює актуальність децентралізованих моделей із простою структурою та локальним управлінням, які здатні забезпечити стійку маршрутизацію в умовах динамічної топології.

Метою роботи є розробка математичної моделі самоорганізованої маршрутизації в телекомунікаційних мережах, яка здатна забезпечувати

ефективну передачу трафіку без централізованого управління, навіть за умов часткової втрати вузлів або змін топології. Такий підхід передбачає формування динамічної маршрутної структури на основі локальної взаємодії між вузлами мережі, що дозволяє зменшити вимоги до обчислювальних ресурсів, уникнути глобального синхронізованого оновлення маршрутної інформації та забезпечити масштабованість у великих мережах.

Основний матеріал

Розглядається математична модель децентралізованого управління трафіком у телекомунікаційній мережі, в якій вузли розташовані на двовимірній сітці або графі з локальними з'єднаннями.

Передача трафіку здійснюється через маршрути, кожен з яких характеризується напрямком та відповідною вагою.

Нехай $x \in \mathbb{R}^2$ позначає просторову позицію вузла, а $\alpha \in \mathbb{R}^2$ – напрямок потенційної передачі трафіку від вузла x . Вага маршруту $w(x, \alpha)$ відображає ймовірність або перевагу передачі трафіку в напрямку α з позиції x .

Оновлення ваг здійснюється на основі локальної взаємодії з оточенням. Зміна ваги $\Delta w(x, \alpha)$ описується інтегральним рівнянням, що враховує просторову близькість між вузлами, взаємодію між потоками та кореляцію напрямків передачі. У загальному вигляді рівняння має вигляд:

$$\Delta w(x, \alpha) = A(\Delta x) \times \int_{\mathbb{R}^2} \int_{\mathbb{R}^2} I(x-y) \cdot C(\alpha-\beta) \cdot w(y, \beta) d\beta dy, \quad (1)$$

де $A(\Delta x)$ – функція, яка визначає топологічну близькість між вузлами, $I(x-y)$ – функція взаємодії в мережі, а $C(\alpha-\beta)$ – функція, що відображає кореляцію між напрямками. Ця модель є повністю локальною: оновлення кожного маршруту залежить лише від інформації про найближче оточення та поточні значення ваг сусідніх вузлів.

Для аналітичного дослідження модель зручно переписати у відносних координатах. Запроваджуються змінні

$$\Delta x = x - y \quad \text{та} \quad \Delta \alpha = \alpha - \beta,$$

що дозволяє представити рівняння у вигляді згортки:

$$\Delta w(x, \Delta \alpha) = \left(\iint A(\Delta x) \cdot I(\Delta x) \cdot C(\Delta \alpha) \times w(x - \Delta x, \alpha - \Delta \alpha) \right) d\Delta \alpha d\Delta x. \quad (2)$$

Це формулювання дозволяє застосувати апарат спектрального аналізу. Оскільки рівняння є лінійним відносно функції w , розв'язок можна представити у вигляді ряду Фур'є за просторовими та напрямковими змінними:

$$w^{(t)}(x, \Delta \alpha) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k e^{if_k x} p_k(\Delta \alpha), \quad (3)$$

де f_k – просторові частоти, $p_k(\Delta\alpha)$ – напрямкові базисні функції, а a_k – часові коефіцієнти амплітуд. Такий підхід дозволяє виявити компоненти, які зростають найшвидше з часом, тобто ті, які відповідають найбільш стабільним маршрутним структурам у мережі.

Основною метою такого аналізу є виділення домінуючої компоненти – просторово-напрямкового режиму, який визначає переважну конфігурацію ваг після самоорганізації.

Саме ця компонента формує узгоджену топологічну структуру маршрутів у мережі, що забезпечує ефективне використання ресурсів, адаптивність до трафіку та стійкість до змін.

Аналітичні результати. На основі представленого інтегрального рівняння оновлення ваг здійснено спектральний аналіз моделі у просторі частот. Для цього розглядається дія інтегрального оператора на функцію маршрутизації, розкладену у базис Фур'є. Припускається, що всі функції, що входять у модель, є згортками і мають достатню гладкість та спадання, щоб забезпечити коректність перетворення Фур'є. Завдяки цьому рівняння набуває мультиплікативного вигляду в частотній області, що істотно спрощує подальший аналіз.

Оператор оновлення ваг у частотному представленні перетворюється на добуток спектральних функцій просторової взаємодії, напрямкової кореляції та власне вагової функції.

Позначимо відповідні перетворення як

$$A(f), \hat{I}(f) \text{ та } C(f),$$

де $f \in \mathbb{R}^2$ – вектор просторової частоти, а $k \in \mathbb{Z}$ – індекс напрямкової гармоніки. Тоді розклад ваги маршруту можна записати як:

$$w^{(t)}(x, \alpha) = \sum_k a_k(t) e^{if_k x} p_k(\alpha), \quad (4)$$

Інтегральний оператор діє на кожному компоненту незалежно, і зміна коефіцієнта $a_k(t)$ у часі має вигляд:

$$\frac{da_k(t)}{dt} = \lambda_k a_k(t), \quad (5)$$

де $\lambda_k = \hat{A}(f) \cdot \hat{I}(f) \cdot \hat{C}(k)$ – спектральний коефіцієнт підсилення для кожної компоненти. Таким чином, еволюція кожної компоненти визначається її власною швидкістю зростання. Найбільше значення λ_k відповідає домінуючій моді, яка з часом витісняє всі інші.

Цей результат означає, що за будь-яких початкових умов система тягнеться до стабільного режиму, який визначається тією комбінацією просторового частотного вектора та напрямкової гармоніки, що забезпечує максимальне підсилення. Така мода формує структурований розподіл маршрутів у мережі: у просторі спостерігається періодична або квазіперіодична організація маршрутних переваг, що відображає впорядковану передачу трафіку.

З математичної точки зору, отриманий результат свідчить про існування спектрального максимуму для функціонального оператора, що керує динамікою системи. Якщо функції $A(x)$, $I(x)$ та $C(\alpha)$ обрані таким чином, щоб мати чітко виражені максимум на певних частотах, система демонструє надійне самоорганізоване впорядкування.

Крім того, така структура забезпечує плавність переходу між різними маршрутними напрямками, а також адаптацію до змін трафіку, оскільки при зміні розподілу навантаження змінюється спектральний максимум, і система автоматично перебудовується на нову оптимальну конфігурацію.

У результаті модель демонструє властивості, необхідні для телекомунікаційної маршрутизації: локальність, адаптивність, стійкість та відсутність потреби в централізованому управлінні. Цей висновок має теоретичне значення для побудови нових класів децентралізованих протоколів маршрутизації, що базуються не на таблицях маршруту, а на динаміці локальних ваг.

Імітаційне моделювання. Для підтвердження аналітичних висновків було проведено чисельне моделювання процесу самоорганізації маршрутних ваг у дискретному варіанті запропонованої моделі. Мережу моделювали як регулярну двовимірну сітку розміром $N \times N$, де кожен вузол мав зв'язки з локальним оточенням – прямими сусідами по сітці. Для кожного вузла зберігалися ваги маршрутів у чотирьох фіксованих напрямках: вгору, вниз, вліво та вправо, які оновлювалися згідно з дискретизованим варіантом рівняння адаптації ваг.

Функції взаємодії було вибрано у вигляді:

$$A(\Delta x) = \exp\left(-\frac{\|\Delta x\|^2}{2\sigma^2}\right), \quad (6)$$

$$C(\Delta\alpha) = \exp\left(-\frac{\|\Delta\alpha\|^2}{2\delta^2}\right), \quad (7)$$

де параметри σ і δ визначають ступінь просторової та напрямкової локальності відповідно. Функція $I(\Delta x)$ бралася рівномірною в межах околу вузла для спрощення реалізації. Початкові значення ваг $w(x, \alpha)$ ініціалізувалися випадковими невеликими відхиленнями навколо середнього значення, що забезпечувало відсутність попередньо заданої структури.

Процес моделювання виконувався ітераційно, з фіксованим кроком часу. На кожному кроці всі вузли одночасно оновлювали свої маршрутні ваги відповідно до локального оточення. Для уникнення неконтрольованого зростання значень було введено нормалізацію ваг у кожному вузлі після оновлення, що гарантувало збереження сталої суми вихідних ймовірностей.

Результати моделювання демонструють формування впорядкованої карти напрямків трафіку. Спостерігається виникнення узгоджених зон, у яких ваги маршрутів орієнтовані в однаковому напрямку. У

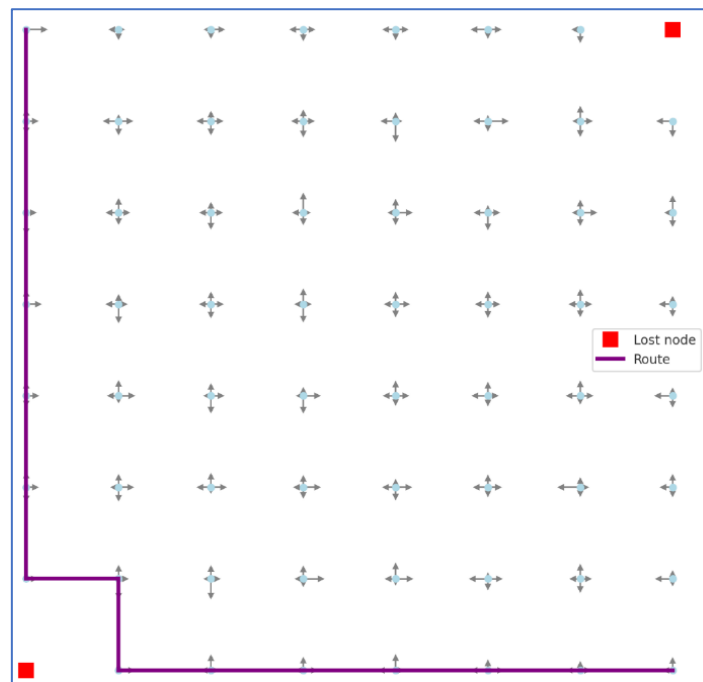


Рис. 3. Візуалізація маршрутизації у мережі з вилюченими кутовими вузлами

Завдяки використанню механізму ітеративного оновлення напрямкових ваг, система не потребує централізованого управління, а результуюча маршрутизована поведінка виявляє високу ступінь адаптивності та стійкості. Це демонструє перспективність методу для побудови децентралізованих протоколів маршрутизації в динамічних телекомунікаційних мережах.

Висновки

Модель характеризується локальністю, оскільки побудова маршрутизації ґрунтується виключно на локальній інформації вузлів без залучення глобальних даних про топологію мережі. Вона виявляє адаптивність, реагуючи на зміну трафіку або конфігурації мережі шляхом автоматичної перебудови маршрутів. Завдяки процесу самоорганізації забезпечується стійкість моделі – виникають стабільні напрямкові компоненти, що підтримують зв'язність мережі. Крім того, модель демонструє властивості нелінійної динаміки: складні маршрутизовані структури формуються в результаті локальних взаємодій без потреби в централізованому управлінні.

На відміну від традиційних підходів, таких як OSPF або AODV, які передбачають глобальне оновлення маршрутних таблиць і потребують вузлів з повною інформацією про топологію, запропонована модель базується на простому рівнянні локального оновлення. Вона не потребує централізованих маршрутизаторів і функціонує виключно на основі локального трафіку та взаємодії сусідніх вузлів. Запропонована модель маршрутизації демонструє, що навіть за

допомогою простого математичного опису можна досягти складної самоорганізованої поведінки в мережі без централізованого управління. Завдяки локальній взаємодії вузлів забезпечується ефективне формування маршрутних структур із властивостями адаптивності та стійкості до змін топології.

Отримані результати відкривають перспективи практичного застосування моделі в різних типах децентралізованих систем, зокрема в безпроводних сенсорних мережах (WSN), мобільних Ad-hoc мережах (MANET), а також в інфраструктурах Інтернету речей (IoT), де важливою є автономність та масштабованість рішень.

У подальших дослідженнях планується розширити модель з урахуванням енергоспоживання вузлів, розробити програмну реалізацію на основі мережевих симуляторів, а також провести порівняльний аналіз із сучасними підходами маршрутизації, включаючи моделі машинного навчання.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Yang H., Guo H., Jia J., Jia Z., Ren A. Self-Organizing and Routing Approach for Condition Monitoring of Railway Tunnels Based on Linear Wireless Sensor Network. *Sensors*. 2024. Vol. 24(20):6502. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24206502>
2. Rahman M. T., Alauddin M., Dey U. K., SADI D. A. S. Adaptive secure and efficient routing protocol for enhance the performance of mobile ad hoc network. *Applied Computer Science*. 2023. Vol. 19, no. 3. P. 133–159. DOI: <https://doi.org/10.35784/acs-2023-29>

3. Shah Z., Levula A., Khurshid K., Ahmed J., Ullah I., Singh S. Routing Protocols for Mobile Internet of Things (IoT): A Survey on Challenges and Solutions. *Electronics*. 2021. Vol. 10(19):2320. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10192320>
4. Воронець В.М., Пустовойтов П.Є. Модель вузла електронної комунікації, що обслуговує тер-трафік. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава, НУ ПП, 2023. Т. 4 (74). С. 152-155. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.4.152>
5. Pustovoitov P., Voronets V., Voronets O., Sokol H., Okhrymenko M. Assessment of QOS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1, no. 4(127). P. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299124>
6. Suh BeomKyu, Ismatov Akobir, Jian Kim, YongBeom Park, Ki-II Kim. A Resilient Routing Protocol to Reduce Update Cost by Unsupervised Learning and Deep Reinforcement Learning in Mobile Ad Hoc Networks. *Electronics*. 2025. Vol. 14(1):166. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14010166>
7. Z. Wang, H. Ding, B. Li, L. Bao, Z. Yang. An Energy Efficient Routing Protocol Based on Improved Artificial Bee Colony Algorithm for Wireless Sensor Networks. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 133577-133596. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010313>
8. Xuan Yang, Jiaqi Yan, Desheng Wang, Yonggang Xu, Gang Hua. WOAD3QN-RP: An intelligent routing protocol in wireless sensor networks – A swarm intelligence and deep reinforcement learning based approach. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 246:123089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.123089>
9. Manhar A., Dembla D. Routing Optimizing Decisions in MANET: The Enhanced Hybrid Routing Protocol (EHRP) with Adaptive Routing based on Network Situation. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. 2023. Vol. 11, no. 10s. P. 136–143. DOI: <https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i10s.7606>
10. Савченко М.В., Шиман М.В. Метод аналізу завантаження вузлів кластеру MESH-мережі на основі математичної моделі мереж Джексона. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава, НУ ПП, 2025. Т. 1 (79). С. 201-204. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.201-204>

Received (Надійшла) 11.10.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Воронець Олександр Миколайович – аспірант кафедри системи інформації ім. В.О. Кравця, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Oleksandr Voronets – PhD Student, Department of Information Systems named after V. O. Kravets, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Oleksandr.Voronets@infiz.khpi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0005-5714-2370>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58986968300>.

Воронець Віталій Миколайович – доктор філософії, старший викладач кафедри «Системи інформації ім. В.О. Кравця», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Vitalii Voronets – PhD, Senior Lecturer, Department of Information Systems named after V. O. Kravets, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Vitalii.Voronets@khpi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-7793-3824>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58986447800>.

Пустовойтов Павло Євгенович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри системи інформації ім. В.О. Кравця, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; Харків, Україна;

Pavlo Pustovoitov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Information Systems named after V. O. Kravets, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Pavlo.Pustovoitov@khpi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3884-0200>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55225675900>.

Самоорганізована маршрутизація в телекомунікаційних мережах з урахуванням втрат вузлів

Oleksandr Voronets, Vitalii Voronets, Pavlo Pustovoitov

Abstract. Relevance. In modern telecommunication networks with dynamic topology, lack of fixed infrastructure and limited node resources, the task of building effective decentralized routing methods is particularly relevant. Traditional protocols based on global information or centralized management are not resistant to node losses and changes in the network structure, which necessitates the development of self-organized models with local decision-making. **Object of research:** traffic routing processes in decentralized telecommunication networks. **Purpose of the article:** development and study of a mathematical model of self-organized routing, which ensures the formation of effective routing structures based on local interaction of nodes without centralized management and maintains network connectivity under conditions of dynamic topology changes. **Research results.** The article proposes a decentralized routing model based on iterative updating of local route weights in network nodes taking into account spatial proximity and directional consistency. Analytical spectral analysis of the integral equation of weight update was performed, which allowed to identify dominant spatial-directional modes that determine stable routed structures. The results of simulation modeling confirmed the ability of the system to self-organize, adapt to node loss and automatically rebuild routes without using global information about the network. **Conclusions.** The proposed self-organized routing model is characterized by locality, adaptability and resistance to topological changes and failures. Unlike traditional routing protocols, it does not require centralized management or global updating of route tables, which reduces computational costs and increases scalability. Scope of application of the obtained results: wireless sensor networks, mobile Ad-hoc networks, Internet of Things infrastructures and other decentralized telecommunication systems with dynamic load and limited node resources.

Keywords: telecommunication network, routing, mathematical model, traffic management, network nodes, wireless sensor networks.

О. В. Запорожець, В. С. Макаренко, О. Ю. Дрозд

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ПЛАНУВАННЯ ПРОЦЕСІВ В ОПЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Анотація. **Актуальність.** Оптимізація планування процесів є критичною для сучасних ОС через різномірні профілі навантаження, де компроміс між латентністю, пропускну здатністю та справедливістю неможливо надійно оцінити лише аналітично. **Об'єкт дослідження:** підсистема планування процесів (CPU scheduling) у мультизадачній операційній системі. **Мета статті:** розробити та обґрунтувати методику оптимізації й налаштування алгоритмів планування на основі імітаційного (дискретно-подійного) моделювання та сформулювати практичні рекомендації для різних профілів задач. **Результати дослідження.** Побудовано параметризовану DES-модель однопроцесорної системи з потоком надходження процесів, ready-чергою, I/O-блокуваннями та накладними витратами контекстних переключень. Реалізовано й порівняно FCFS, SJF, Round Robin, пріоритетне планування, MLQ, MLFQ, модель справедливого планування, подібну до CFS, та адаптивний RR. Експериментально оцінено час очікування і відповіді, пропускну здатність, завантаження CPU, частку накладних витрат CS та справедливість (індекс Джейна) у чотирьох сценаріях навантаження: інтерактивному, CPU-heavy, bursty та змішаному за пріоритетами. **Висновки.** Невитіснювальні стратегії демонструють конкурентні середні значення лише в окремих режимах, тоді як витіснювальні та адаптивні підходи краще відповідають вимогам змішаних навантажень, але потребують акуратного тюнінгу кванта часу, гранулярностей і механізмів протидії голодуванню. Симуляційний підхід забезпечує відтворене порівняння та виявлення параметричних зон, що ведуть до небажаних режимів. Сфера використання отриманих результатів: вибір і налаштування політик планування в ОС загального призначення, навчальні симулятори та інструменти аналізу продуктивності.

Ключові слова: планування процесів, операційні системи, дискретно-подійне моделювання, CFS, MLFQ, Round Robin.

Вступ

Планування процесів (CPU scheduling) є базовим механізмом мультизадачної операційної системи: за наявності кількох готових до виконання задач планувальник визначає порядок і тривалість їх виконання, балансує між часом відповіді, пропускну здатністю, завантаженням CPU і справедливістю [1]. Актуальність оптимізації планування посилюється різномірністю сучасних навантажень (інтерактивні програми, серверні задачі, фонові batch-обчислення), для яких один «універсальний» критерій оптимальності є недостатнім: покращення відгуку може погіршувати throughput; зменшення середнього очікування може створювати голодування довгих задач тощо.

Стандартизація інтерфейсів планування визначає мінімальні «контрактні» механізми. POSIX.1 описує політики, зокрема SCHED_FIFO та SCHED_RR, а також відповідні механізми керування параметрами планування [2].

Паралельно практична реалізація планувальників у ядрах загального призначення еволюціонує: документація Linux детально описує CFS як «fair» підхід, а також EEVDF як наступний етап із вибором задачі за «віртуальним дедлайном» серед «eligible» задач [3].

Велика частина оптимізації планувальника – це оптимізація параметрів і евристик (кванти, гранулярності, правила підвищення пріоритетів/boost, класи задач), що складно робити «аналітично» для реальних навантажень. Тому імітаційне моделювання є доцільним інструментом: воно дозволяє повторювати порівнювати алгоритми у контрольованому середовищі, а також досліджувати чутливість метрик до параметрів [4].

Огляд останніх досліджень і публікацій.

POSIX-орієнтовані джерела визначають базові політики й інтерфейси. Згідно з POSIX.1-2017 у <sched.h> присутні принаймні SCHED_FIFO (FIFO для фіксованих пріоритетів) та SCHED_RR (round-robin для фіксованих пріоритетів), що формує основу для переносимих застосунків (особливо в real-time контексті) [2].

У Linux практичні деталі політик, класів і впливу nice описує sched(7): nice впливає на SCHED_OTHER/SCHED_NORMAL та споріднені політики; ступінь впливу може змінюватися між версіями, але в «поточній реалізації» наводиться коефіцієнт близько 1.25 на одиницю різниці nice [5].

Офіційна документація Linux описує CFS як планувальник «desktop/general-purpose» класу fair, що прагне моделювати «ідеальний багатозадачний CPU» і використовує поняття віртуального часу/справедливого розподілу. Історично його пов'язують із роботою розробника Ingo Molnar [6] (merge у Linux 2.6.23). Далі у документації Linux виділено EEVDF Scheduler, який обирає задачу з множини «eligible» (за лагом) і використовує «virtual deadline» як критерій вибору найближчого кандидата до виконання. Опис EEVDF на kernel.org доповнюється технічними оглядами, зокрема матеріалами Peter Zijlstra у спільноті та статтями LWN.net щодо доробки EEVDF [7].

У період 2015–2026 рр. виділяються кілька напрямів, релевантних цій темі. Перший – дослідження «реальних» проблем і ефектів планувальника в популярних ядрах. Робота «The Linux Scheduler: a Decade of Wasted Cores» (EuroSys 2016) показала, що дефекти/евристики та балансування можуть призводити до недовикористання ядер навіть за наявності роботи, і підкреслила складність підтримки планувальника у

довгостроковій еволюції. Серед авторів – Jean-Pierre Lozi та Alexandra Fedorova [8]. Другий – розвиток адаптивних/гібридних алгоритмів (модифікації RR, MLFQ, змішані правила). Наприклад, у статті ORR: Optimized Round Robin CPU Scheduling Algorithm (ACM, 2021) запропоновано оптимізацію RR з акцентом на зменшення середнього очікування/turnaround і кількості контекстних переключень для time-sharing середовищ [6]. У контексті MLFQ важливо, що навіть «класичний» MLFQ може отримувати сучасні модифікації для спеціальних вимог: зокрема, MLFQ-RT для multi-core real-time задач досліджено через моделювання (ACM SE 2018) [9]. Третій – систематизація і порівняльне навчально-експериментальне оцінювання. У відкритій статті Heliyon (2024) “Study and evaluation of CPU scheduling algorithms” автори використовують симулятор для порівняння алгоритмів у контрольованому середовищі та акцентують на «непередженості» умов порівняння [10]. Четвертий – методологія імітаційного моделювання і перевірка/валідація моделей. Класичну методологію DES і експериментального дизайну систематизує підручник Law A. M. “Simulation Modeling and Analysis” [11]. Питання V&V (verification & validation) системно розглянуте в роботах Robert G. Sargent (зокрема, матеріали Winter Simulation Conference; пізніше “advanced tutorial”) [12].

Таким чином, сучасний стан теми визначається двома «полюсами»: еволюцією реальних планувальників (CFS–EEVDF у Linux) та активністю досліджень гібридних/адаптивних алгоритмів і методів їх оцінювання через симуляцію.

Постановка задачі

Метою дослідження є розробка та обґрунтування методики оптимізації алгоритмів планування процесів в операційних системах на основі імітаційного моделювання та надання експериментально підтверджених рекомендацій щодо вибору / налаштування алгоритмів під різні профілі навантаження.

Об'єктом дослідження є підсистема планування процесів (CPU scheduling) у мультизадачній ОС; у термінах POSIX – політики планування та їх поведінкові властивості (FIFO/RR для фіксованих пріоритетів тощо). Предмет дослідження: порівняльні характеристики алгоритмів (FCFS, SJF, RR, Priority, Multilevel, MLFQ, CFS-подібний, адаптивний RR) і чутливість показників до параметрів (квант часу, правила підвищення пріоритетів, кількість черг, гранулярність/латентність тощо).

При цьому розглядаються такі задачі (RQs):

1) оцінити вплив вибору алгоритму планування на час очікування, час відповіді, пропускну здатність, завантаження CPU, справедливість, витрати контекстних переключень у різних сценаріях навантаження;

2) визначити параметричні «зони» (кванти, boost-інтервали), де алгоритм переходить у небажаний режим (надмірні перемикання, голодування);

3) сформулювати практичні рекомендації щодо оптимізації й адаптації алгоритмів (евристики класифікації задач, адаптивний квант, aging) [13].

Невизначені вхідні дані: цільова ОС/версія ядра, апаратна платформа, робочі трасування задач, типові значення витрат перемикання – не вказано. Для компенсації обрано параметризовану модель, де суттєві параметри є явними й можуть бути замінені на вимірні значення в майбутньому.

Імітаційне моделювання реалізовано як дискретно-подійну (DES) модель: час рухається стрибками між моментами подій (надходження процесу, завершення CPU-бурсту, завершення I/O, закінчення кванта/таймслайсу, контекстне переключення). Такий підхід є стандартним для систем черг / планування й добре узгоджується з практикою використання бібліотек на кшталт SimPy (процеси, середовище, події) [4].

Загальні принципи побудови DES-моделі, вибору рівня деталізації, планування експериментів і аналізу виходів відповідають канонічній методології: формулювання проблеми – концептуальна модель – реалізація – верифікація – валідація – дизайн експериментів – аналіз результатів [11].

Середовище реалізації моделі: Python (custom DES); альтернативно може бути використано SimPy як стандартний DES-фреймворк [14].

Абстракція системи:

– один CPU (одне ядро) – спрощення для виділення «чистого» ефекту алгоритму CPU scheduling. Мультипроцесорні ефекти (load balancing, NUMA, конкуренція кешів) винесені як перспектива. Актуальність мультиядерного аспекту підтверджується практичними кейсами (EuroSys 2016) і сучасними розширеннями MLFQ для multi-core [8];

– процес складається з послідовності CPU-бурстів із I/O паузами (блокування);

– контекстне переключення має накладну вартість `cs_overhead` (у моделі – 0.1 мс; значення параметризується і в реальному дослідженні має бути замінене вимірюванням для цільової системи).

Невизначені параметри (позначено “не вказано”): апаратні характеристики, тип дискової/мережевої підсистеми, реальна політика I/O планування, таймерні гранулярності ОС, пріоритетні діапазони та політики в цільовій ОС.

Використано такі метрики (у дужках – позначення):

– час очікування у ready-черзі (W): сумарний час, коли процес готовий до виконання, але не виконується;

– час відповіді (R): від надходження процесу до першого отримання CPU (критично для інтерактивних задач);

– пропускну здатність (X): кількість завершених процесів за одиницю часу (процесів/с);

– завантаження CPU (U): частка часу, коли CPU виконує корисну роботу (user CPU), без накладних витрат перемикання;

– витрати контекстних переключень (CS%): частка часу, витрачена на контекстні переключення, відносно загального часу моделювання;

– справедливість (J): застосовано індекс Джейна (Jain's fairness index) над похідними величинами, що характеризують рівномірність «ефективності

обслуговування». Індекс лежить у діапазоні [0;1], 1 означає максимальну рівномірність [15].

Індекс справедливості Джейна обчислюється як

$$J = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{\left(n \sum_{i=1}^n x_i^2\right)},$$

де n – кількість процесів у вибірці, x_i – значення показника для i -го процесу; $J \in [0;1]$.

У роботі використано дві інтерпретації показника справедливості: `fairness_ready_J` – Jain-індекс над величинами

$$x_i = \frac{T_{CPU,i}}{T_{CPU,i} + W_{ready,i}},$$

де $T_{CPU,i}$ – сумарний час виконання процесу на CPU, а $W_{ready,i}$ – сумарний час очікування в `ready`-черзі (I/O-паузи не враховуються); `fairness_batch_J` – аналогічний індекс, але обчислений лише для підмножини CPU-bound (batch) процесів, щоб відокремити ефект пріоритетизації інтерактивних задач.

Верифікація виконувалась як перевірка коректності реалізації подій і інваріантів (невід'ємність залишку CPU-бурсту, монотонність часу, завершення кожного процесу, збереження балансу подій).

Валідація у повному сенсі потребує зіставлення з реальними трасами ОС/бенчмарками – не вказано (відсутні дані). Тому результати інтерпретуються як модельні та слугують для порівняльного аналізу і чутливості до параметрів.

Визначено 4 сценарії (кожен – $N=120$ процесів, 6 повторів, різні `seed`):

- сценарій А (інтерактивний): 70% I/O-bound/інтерактивних процесів із багатьма короткими CPU-бурстами та I/O-паузами; 30% CPU-bound. Інтервали приходу – експоненційні (потік Пуассона);
- сценарій В (CPU-heavy): домінування CPU-bound процесів (80%), вищий тиск на CPU;
- сценарій С (burstiness): пачкові надходження (чергування високої/низької інтенсивності) та важкохвості розподіли CPU-бурстів для підвищення дисперсії;
- сценарій D (priority-mixed): змішаний профіль із часткою «system» задач (вищі пріоритети), що

дозволяє оцінити ризики голодування і переваги `boosting/aging`.

Алгоритми реалізовано в моделі як модулі вибору наступного процесу та правила витіснення:

- FCFS (First-Come, First-Served): невитіснювальний; черга FIFO. Типовий недолік – «convoy effect» при змішуванні довгих CPU-bound і коротких I/O-bound задач [1];

- SJF (Shortest Job First): невитіснювальний; вибір за мінімальною довжиною наступного CPU-бурсту. У реальній ОС довжина бурсту невідома наперед і оцінюється, але в моделі для «`current bound`» використано фактичне значення; ризик голодування довгих задач є очікуваним;

- Round Robin (RR): витіснювальний; квант q ;

- Priority (PRIO): витіснювальний пріоритетний; при появі задачі з вищим пріоритетом виконується негайне витіснення (у межах моделі). Ризики голодування нижчих пріоритетів потребують `aging` (у цій базовій конфігурації – спрощено, без повної динамічної зміни) [1];

- Multilevel Queue (MLQ): окремі черги для класів `system/interactive/batch` із жорстким пріоритетом черг (верхні завжди витісняють нижні);

- Multilevel Feedback Queue (MLFQ): багаторівнева черга з «зворотнім зв'язком»: процеси стартують на верхньому рівні з малим квантом; якщо вичерпують квант – понижуються, якщо блокуються (I/O) – зберігають/підвищують пріоритет; періодично застосовується `boost` для протидії голодуванню. Це класична відповідь на «як планувати без знання майбутнього», використовуючи історію виконання [13];

- CFS-подібний (CFS-model): спрощена модель «fair» планування (віртуальний час `vruntime`, вибір мінімального `vruntime`, таймслайс як функція `target_latency` і `min_granularity`). У Linux ці поняття мають документовані аналоги (CFS design) [3];

- ARR (Adaptive Round Robin): адаптивний квант з обрізанням у межах [2;20] мс. Ідея узгоджується з напрямом оптимізації RR через «розумний квант», який активно досліджується у 2015–2026 (напр., ORR) [6].

Параметри експериментального моделювання наведено у табл. 1, а результати моделювання для кожного алгоритму та сценарію – у табл. 2.

Таблиця 1 – Параметри експериментального моделювання

Параметр	Значення (у моделі)	Коментар
Кількість процесів у сценарії	120	Фіксовано для порівняльності
Кількість повторів (реплікацій)	6	Різні <code>seed</code> для усереднення
Модель CPU	1 ядро (1 сервер)	Multi-core – перспектива
Вартість контекстного переключення <code>cs_overhead</code>	0.1 мс	Параметр; у реальній системі – не вказано
RR квант q	4 мс	Типове значення для демонстрації чутливості; «оптимальний» залежить від навантаження
MLQ квант (system/interactive)	3 мс	<code>batch</code> у MLQ – FCFS
MLFQ рівні/кванти	3 рівні: [2, 4, 8] мс	Демонстраційний набір; підлягає оптимізації
MLFQ boost interval	50 мс	Протидія голодуванню
CFS-model <code>target_latency</code>	24 мс	Концептуальний аналог <code>sched_latency</code>
CFS-model <code>min_granularity</code>	3 мс	Концептуальний аналог <code>sched_min_granularity</code>
Діапазон ARR квантів	2...20 мс	Запобігання крайнім режимам

Таблиця 2 – Результати моделювання

Алгоритм	Сер. очікування, мс	Сер. відповідь, мс	p95 очікування, мс	p95 відповідь, мс	Пропускна здатн., проц/с	Завантаження CPU, %	Накладні CS, %	Перемикач контексту	J_ready	J_batch
Сценарій А (інтерактивний)										
FCFS	3389.3	922.2	4672.1	1808.6	18.12	85.4	1.84	1229	0.126	0.320
SJF	1419.2	870.4	4241.9	3776.0	19.24	97.6	1.96	1228	0.342	0.228
RR	2597.6	127.7	4825.0	252.9	18.78	91.2	3.53	2268	0.373	0.539
ARR	2498.8	96.4	4623.7	180.6	18.33	89.1	3.49	2284	0.497	0.619
PRIO	1522.0	1077.9	4833.7	4406.8	20.08	95.5	4.16	2500	0.320	0.518
MLQ	1624.5	422.9	4990.0	1703.1	20.25	97.2	2.36	1399	0.334	0.534
MLFQ	933.2	23.1	2231.1	71.5	19.26	81.5	5.36	1844	0.420	0.542
CFS	2111.9	2.0	4953.7	5.0	19.96	95.3	4.17	2521	0.217	0.822
Сценарій В (CPU-bound домінує)										
FCFS	6602.9	2784.2	9807.8	5323.3	10.90	94.5	0.44	484	0.150	0.219
SJF	2904.7	1980.6	7859.0	6847.3	12.00	99.5	0.47	472	0.253	0.297
RR	5552.4	213.0	9125.4	403.2	11.66	96.9	2.71	2790	0.607	0.743
ARR	6190.6	920.6	9368.7	1715.2	11.36	96.4	0.89	945	0.410	0.567
PRIO	4309.4	3312.0	9730.5	8589.9	11.27	97.1	2.86	3063	0.379	0.471
MLQ	5092.5	482.7	9279.0	1831.9	12.35	99.3	0.68	662	0.291	0.406
MLFQ	3784.6	64.1	7306.1	160.3	11.83	94.4	4.75	3993	0.524	0.635
CFS	5529.7	3.4	9899.9	9.2	10.86	96.6	3.38	3746	0.373	0.753
Сценарій С (bursty/важкохвості CPU-бурсти)										
FCFS	9305.2	1591.2	16811.9	5478.0	11.09	98.6	0.12	161	0.101	0.139
SJF	4338.0	1624.6	10264.5	5659.6	11.87	99.7	0.07	96	0.181	0.234
RR	8393.2	269.8	16562.8	526.6	10.31	93.9	2.56	3415	0.404	0.477
ARR	8702.2	726.1	17007.8	1442.5	10.67	98.1	0.78	1035	0.329	0.405
PRIO	6806.0	2964.5	16646.7	11843.6	11.12	97.9	1.68	2345	0.262	0.356
MLQ	8618.8	456.6	16883.1	1802.9	11.34	99.4	0.26	352	0.186	0.231
MLFQ	5639.4	74.5	12265.6	197.3	12.10	92.0	4.94	7116	0.493	0.601
CFS	7909.9	3.0	17408.1	9.1	11.36	98.0	1.91	2609	0.229	0.670
Сценарій D (змішаний за пріоритетами)										
FCFS	4246.4	1505.1	8053.3	5113.3	13.05	96.6	0.58	368	0.146	0.277
SJF	3310.6	1882.2	6976.7	6260.4	13.69	99.2	0.42	278	0.227	0.263
RR	4269.8	212.6	7936.4	391.0	12.71	95.6	2.44	1681	0.442	0.545
ARR	4449.5	517.2	8348.2	992.2	13.44	99.1	0.60	403	0.332	0.471
PRIO	4274.8	1865.6	8162.5	7865.4	12.94	97.2	1.81	1189	0.243	0.352
MLQ	5071.9	395.7	10146.5	2098.0	12.30	94.8	0.74	499	0.221	0.293
MLFQ	2953.4	48.0	5784.4	123.5	13.28	94.3	4.40	3065	0.499	0.640
CFS	4510.6	1.3	9137.4	3.9	12.83	97.8	2.11	1400	0.223	0.812

Аналіз результатів моделювання

FCFS у змішаних сценаріях демонструє високий час відповіді та/або великі хвости розподілу очікування (p95), що пояснюється «convoy effect» – короткі інтерактивні задачі «прилипають» за довгими CPU-bound у FIFO. SJF у CPU-heavy та bursty сценаріях мінімізує середній час очікування (В, С) – що відповідає класичному твердженню про оптимальність SJF для середнього очікування за припущення знання довжин бурстів. Однак водночас час відповіді та p95 можуть погіршуватись, що відображає потенційну дискримінацію довгих задач. RR забезпечує низький (відносно FCFS/SJF) час відповіді, але різко збільшує кількість контекстних переключень і частку накладних витрат у важких навантаженнях (В, С), що є відомим недоліком RR при малому кванті. Мотив саме такого «тунінгу кванта» віддзеркалюється в сучасних модифікаціях RR (напр., ORR), де оптимізація спрямована на зниження NCS/очікування/turnaround. MLQ (жорсткі черги) у priority-mixed сценаріях може давати

непоганий «сервіс» верхніх класів, але нижні класи у принципі ризикують голодуванням без спеціальних правил. Це загальна проблема пріоритетних і багаторівневих схем, що зазвичай компенсується aging/boost. MLFQ у сценаріях А і D демонструє найкращі/одні з найкращих показників часу відповіді та очікування, що відповідає ідеї MLFQ: наближати інтуїцію SJF без знання майбутнього, використовуючи історію (короткі/інтерактивні задачі залишаються нагорі). CFS-модель у цій постановці дає мінімальний середній час відповіді, що узгоджується з філософією fair-планування і пріоритетністю latency-sensitive поведінки. Водночас «справедливість» у глобальному сенсі залежить від того, що саме вимірюється: для batch-класу fairness_batch_J у сценаріях А/D є високою (≈ 0.82), але fairness_ready_J може бути нижчою через свідоме «підтягування» інтерактивних/часто-блокуючих задач (що в Linux historically реалізовано через механізми vruntime/latency). Сучасний розвиток EEVDF у Linux демонструє, що навіть «справедливі» планувальники уточнюють критерій вибору

процесу (eligible + virtual deadline), щоб комбінувати справедливість і латентність.

Рекомендації щодо оптимізації

Рекомендації поділено на параметричні налаштування, адаптивні стратегії та евристики.

Параметричні налаштування RR/MLFQ. Для RR ключовим є квант часу: надто малий квант збільшує накладні витрати (CS%), надто великий погіршує реактивність інтерактивних задач. Практично доцільно підбирати квант від медіанного або близького до медіанного CPU-бурсту інтерактивного класу й перевіряти чутливість метрик у симуляції; подібна логіка властива і сучасним оптимізаціям RR (ORR та ін.).

Для MLFQ параметри – кількість рівнів, кванти рівнів, інтервал boost – є основними регуляторами компромісів: зменшення квантів верхніх рівнів покращує відгук, але збільшує перемикування; надто рідкісний boost підвищує ризик starvation нижніх рівнів. Класична постановка MLFQ прямо підкреслює роль boost у протидії голодуванню.

Адаптивні стратегії. Доцільним є динамічний квант (ARR-подібні) як мінімальна адаптація RR: якщо квант прив'язати до статистики бурстів (медіана/квантіль), можна зменшити зайві переключення в CPU-heavy режимах та утримати прийнятний відгук у інтерактивних. Це узгоджується з емпіричною мотивацією модифікацій RR у літературі. Для пріоритетних і MLQ-схем потрібні aging/boost правила, інакше виникає системний ризик голодування; навчальні матеріали з CPU scheduling прямо вказують на aging як стандартну протидію starvation.

Налаштування fair-планування (CFS/EEVDF-подібні). Практична оптимізація часто зводиться до контролю «латентності» та гранулярностей (аналогічно tunables, відомим у Linux екосистемі). Офіційні матеріали описують сенс параметрів на кшталт sched_min_granularity (мінімальний період виконання задачі) та загальної «латентності» як концептуального бюджету розподілу між tunnable задачами.

Під час перенесення на реальну ОС слід враховувати, що доступність/статус tunables може змінюватися між версіями (наприклад, переміщення в debugfs у деяких дистрибутивах/версіях), тому оптимізація має бути прив'язана до конкретної платформи.

Припущення моделі:

– один CPU; відсутні multi-core ефекти (балансування, NUMA, конкуренція кешів). Актуальні дослідження показують, що саме multi-core аспекти можуть домінувати у продуктивності планувальника в реальних системах;

– вартість контекстного переключення стала 0.1 мс. У реальності вона залежить від архітектури, TLB/кеш ефектів, політики ядра;

– для SJF припущено знання довжини майбутнього бурсту (це upper bound); реальна ОС оцінює бурст за історією;

– CFS реалізовано як спрощену модель; EEVDF у точній формі не змодельовано (потребує відтворення eligibility/lag/deadline механізмів на рівні, близькому до документації).

Відкриті питання для продовження:

– повна симуляція EEVDF і порівняння з CFS-подібною моделлю за однакових параметрів (особливо хвосту p95/p99);

– підтвердження моделі на реальних трасах (perf/sched trace) для цільової ОС/ядра;

– розширення моделі на multi-core із балансуванням і affinity; співставлення з відомими проблемами/патчами продуктивності планувальника (EuroSys 2016);

– оцінка впливу політик реального часу (POSIX SCHED_FIFO/SCHED_RR) і змішаних класів із fair-плануванням у Linux.

Висновки

У роботі запропоновано строгий підхід до оптимізації планування процесів через дискретно-подійне моделювання: алгоритми порівнюються в контрольованих умовах за узгодженими метриками, включно з часом очікування, часом відповіді, пропускну здатністю, завантаженням CPU, справедливістю та накладними витратами контекстних переключень.

Методологія узгоджена з базовими принципами DES та рекомендаціями щодо V&V симуляційних моделей. Експерименти на чотирьох сценаріях показують, що:

– невитіснювальні алгоритми (FCFS, SJF) можуть бути конкурентними за середніми метриками лише у частині режимів, але часто програють за відгуком і хвостами розподілу;

– витіснювальні та адаптивні стратегії (RR/ARR/MLFQ/CFS-model) краще відповідають вимогам сучасних змішаних навантажень, але потребують акуратного тюнінгу для контролю накладних витрат;

– фактична еволюція Linux (CFS – EEVDF) підтверджує, що компроміс «справедливість–латентність» є центральною проблемою і потребує експериментально підтверджуваних рішень на реальних профілях.

Перспективи подальших досліджень:

1) включення точнішої моделі EEVDF і механізмів wakeup/preemption;

2) multi-core/NUMA розширення;

3) калібрування параметрів моделі за трасами реальної системи;

4) автоматизований пошук оптимальних параметрів (кванти, boost, гранулярності) через планування експериментів та оптимізацію на виходах симуляції (в дусі сучасних підходів до симуляційного дизайну).

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлених в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Arpaci-Dusseau R. H., Arpaci-Dusseau A. C. Operating Systems: Three Easy Pieces. CPU Scheduling (chapter). University of Wisconsin–Madison. URL: <https://pages.cs.wisc.edu/~remzi/OSTEP/cpu-sched.pdf>
2. IEEE. Portable Operating System Interface (POSIX) Base Specifications, Issue 7 (IEEE Std 1003.1-2017). DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8277153>
3. Linux Kernel Documentation. CFS scheduler design. URL: <https://docs.kernel.org/scheduler/sched-design-CFS.html>
4. Zinoviev D. Discrete Event Simulation: It's Easy with SimPy! arXiv:2405.01562, 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.01562>.
5. Kerrisk M. sched (7) – Linux manual page. URL: <https://man7.org/linux/man-pages/man7/sched.7.html>
6. Lozi J. P., et al. The Linux scheduler. EuroSys 2016. DOI: <https://doi.org/10.1145/2901318.2901326>.
7. Linux Kernel Documentation. EEVDF scheduler. URL: <https://docs.kernel.org/scheduler/sched-eevdf.html>
8. Rasouli A., et al. MLFQ-RT: A multi-level feedback queue real-time scheduler for embedded systems. CODES+ISSS 2014. DOI: <https://doi.org/10.1145/2656075.2656108>.
9. Chen X. Calendar queue: a new real-time calendar-based priority queue. Journal of Parallel and Distributed Computing, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0743-7315\(92\)90068-A](https://doi.org/10.1016/0743-7315(92)90068-A).
10. Simpson K., et al. Simulation-based experimentation on scheduling algorithms. Heliyon, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10507>.
11. Law A. M., Kelton W. D. Simulation Modeling and Analysis. 5th ed. McGraw-Hill Education, 2015. ISBN: 978-0073401324. URL: <https://search.worldcat.org/de/title/simulation-modeling-and-analysis/oclc/1022581268>
12. Sargent R. G. Verification and validation of simulation models. In: Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference (WSC), 2010, pp. 166–183. DOI: <https://doi.org/10.1109/WSC.2010.5679166>.
13. Arpaci-Dusseau R. H., Arpaci-Dusseau A. C. Operating Systems: Three Easy Pieces. Scheduling: The Multi-Level Feedback Queue (chapter). URL: <https://pages.cs.wisc.edu/~remzi/OSTEP/cpu-sched-mlfq.pdf>
14. SimPy Documentation. Basic Concepts. Available: https://simpy.readthedocs.io/en/latest/simpy_intro/basic_concepts.html
15. Jain R., Chiu D.-M., Hawe W. A Quantitative Measure Of Fairness And Discrimination For Resource Allocation In Shared Computer Systems. arXiv:cs/9809099. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/9809099>

Received (Надійшла) 18.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Запорожець Олег Васильович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Oleg Zaporozhets – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: oleg.zaporozhets@nure.ua; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-7831-8479>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=15728942500>.

Макаренко Владислав Сергійович – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Vladyslav Makarenko – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: vladyslav.makarenko@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0002-9891-3627>.

Дрозд Олег Юрійович – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Oleh Drozd – PhD student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: oleh.drozd@nure.ua; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0007-4285-4505>.

Optimization of process planning algorithms in operating systems using simulation modeling

Oleg Zaporozhets, Vladyslav Makarenko, Oleh Drozd

Abstract. Relevance. Optimizing process scheduling is critical for modern operating systems due to heterogeneous workload profiles, where the trade-off between latency, throughput, and fairness cannot be reliably assessed through analytical methods alone. **Object of research:** the CPU scheduling subsystem in a multitasking operating system. **Purpose of the article.** to develop and justify a methodology for optimizing and tuning scheduling algorithms based on simulation (discrete-event) modeling, and to formulate practical recommendations for different task profiles. **Research results.** A parameterized DES model of a single-processor system was built, including a process arrival stream, a ready queue, I/O blocking, and context-switch overhead. The following were implemented and compared: FCFS, SJF, Round Robin, priority scheduling, MLQ, MLFQ, a fair-scheduling model similar to CFS, and adaptive RR. Waiting time and response time, throughput, CPU utilization, the share of context-switch overhead, and fairness (Jain's index) were experimentally evaluated across four workload scenarios: interactive, CPU-heavy, bursty, and mixed by priorities. **Conclusions.** Non-preemptive strategies show competitive average values only in certain modes, whereas preemptive and adaptive approaches better meet the requirements of mixed workloads but require careful tuning of the time quantum, granularities, and anti-starvation mechanisms. The simulation approach enables reproducible comparisons and the identification of parameter regions that lead to undesirable operating regimes. Application area of the results: selection and tuning of scheduling policies in general-purpose operating systems, educational simulators, and performance analysis tools.

Keywords: CPU scheduling, operating systems, discrete-event simulation, CFS, MLFQ, Round Robin.

М. Ю. Костяк, О. Ю. Синявський

Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

СИНТЕЗ СИГНАЛУ УПРАВЛІННЯ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ БПЛА МЕТОДОМ ДИНАМІЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ

Анотація. Актуальність. Необхідність захисту каналу зв'язку при управлінні БПЛА від засобів радіоелектронної протидії та радіотехнічних завад для розширення можливостей їх використання. **Об'єкт дослідження:** сигнали управління каналів зв'язку БПЛА. **Мета статті:** розробка методу синтезу сигналу управління каналів зв'язку БПЛА із використанням апарату динамічного програмування. **Результати дослідження.** У статті запропоновано метод динамічного програмування при синтезі сигналів управління каналу зв'язку БПЛА. Розроблений метод дозволяє обчислювати параметри сигналу управління як для дискретного, так й безперервного часу спостереження. Такий підхід дозволяє враховувати обмеження на сигнал управління у дискретному або безперервному часі, тобто враховувати дію засобів радіоелектронної протидії та радіотехнічних завад для локального сектору функціонування каналу зв'язку БПЛА. **Висновки.** Запропонований метод динамічного програмування синтезу сигналів управління каналу зв'язку БПЛА пропонується використовувати для забезпечення стійкого та надійного управління БПЛА при дії засобів радіоелектронної протидії та радіотехнічних завад.

Ключові слова: БПЛА; засіб; захищеність; інформація; канал зв'язку; математична модель; синтез; спостереження; радіоелектронна протидія; радіотехнічні завади; управління.

Вступ

Постановка проблеми. При використанні БПЛА на сьогодні актуальним завданням є забезпечення коректного та надійного управління польотом, яке, як правило, забезпечується через канал зв'язку [1, 2]. Надійне управління польотом БПЛА забезпечується шляхом передавання / приймання необхідної інформації у реальному масштабі часу про значення параметрів польоту [3]. До таких значень параметрів польоту належать вектори дійсних прискорень, швидкості, радіус-вектори центру мас, а також вектору кутової швидкості та кутів тангажу, ристання й крену [4, 5]. При цьому таку інформацію необхідно отримувати із потрібними точністю та тактом (періодом) оновлення.

На сьогодні широкого розповсюдження знайшли засоби радіоелектронної протидії та радіотехнічних завад, які суттєво обмежують як дальність дії БПЛА, так й можливість їх використання щодо функціонального призначення [6, 7]. Такі засоби виявляють канали зв'язку та їх придушують за рахунок впливу на сигнал управління. Тому актуальним завданням є синтез сигналів управління БПЛА, які є стійкими засоби радіоелектронної протидії та радіотехнічних завад [7, 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботах [3, 4] розглянуто систему управління БПЛА за допомогою оператора при використанні захищених частот. У роботах [6, 9, 10] показано, що на сьогодні перспективним напрямом є використання системи управління БПЛА типу Wi-Fi FPV (використання потокового відео у режимі реального часу). При цьому розрізняють: управління на частоті 2,4 ГГц (БПЛА може відлетіти на відстань до 1 км не втрачаючи сигналу управління); управління на (5,0...5,4) ГГц (5G Wi-Fi, цифрове) – якість передачі відео на цій частоті краща, ніж на 2,4 ГГц, та дозволяє досягти більшої дальності польоту (5...7 км). При цьому канал управління більш захищений за рахунок цифрового шифрування; управління на 5.8 ГГц (аналогове) – якість передачі відео на

частоті краща, ніж у попередніх випадках, дозволяє досягти більшої дальності польоту (до 10 км), але має низький рівень завадозахищеності. У роботах проведено порівняння частот управління БПЛА при використанні навігаційних радіосигналів системи GPS (приблизно 1,0...2,0 ГГц) та типу Wi-Fi FPV. Результати порівняння свідчать про простоту використання засобів радіоелектронної протидії та радіотехнічних завад у діапазоні (0,9...3,0) ГГц. При цьому блокуються сигнали GPS і Wi-Fi FPV (частота 2,4 ГГц).

Отже, з метою збільшення захищеності каналів зв'язку БПЛА пропонується синтезувати сигнали управління складної нестандартизованої форми.

Метою роботи є розробка методу синтезу сигналу управління каналів зв'язку БПЛА із використанням апарату динамічного програмування.

Основний матеріал

Для синтезу сигналів управління каналу зв'язку БПЛА пропонується використання методу динамічного програмування [11, 12]. Математична задача синтезу сигналів управління каналу зв'язку БПЛА може бути сформульована наступним чином. Необхідно знайти функцію (параметри сигналу) $u(t)$, для якої функціонал $\Psi = \int_0^T \psi(x_\alpha, u, t) dt$ приймає мінімальне значення. В цьому функціоналі параметри x_α залежать від параметрів сигналу управління $u(t)$ через систему диференціальних рівнянь $\dot{x} = \phi(x_\beta, u, t)$.

Метод динамічного програмування є ефективним при накладанні обмежень на синтезовану функцію. Для нашого випадку такі обмеження накладаються на сигнал управління $u(t)$ у вигляді обмежень на його рівень типу $|u(t)| \leq U_{max}$. Для задачі синтезу параметрів сигналів управління каналу зв'язку БПЛА за показник якості приймаємо значення чутливості Ψ на каналі приймача БПЛА

$$\Psi = S = \int_0^T \sum_{i=1}^m b_i^2(t, \{u\}) dt, \quad (1)$$

де $b_i(t, \{u\})$ – коефіцієнти чутливості відповідно значень z_i – засобів радіоелектронної протидії та радіотехнічних завад при сигналі управління $u(t)$.

Для спрощення розрахунків і розуміння фізичного змісту синтезу сигналів управління каналу зв'язку БПЛА пропонується замість мінімуму чутливості Ψ використовувати максимум функції потужності сигналу на приймачі БПЛА S .

Тоді замінімо величини $\psi(x_a, u, t)$ величиною $\sum_{i=1}^m b_i^2(t, \{u\})$. Тоді для величини потужності S отримаємо

$$S = \int_{\gamma=r-m+1}^r \sum_{i=1}^2 \zeta_{\gamma}^2 dt.$$

Представимо функцію H у вигляді:

$$H = -\frac{1}{2} \sum_{\gamma=r-m+1}^r \zeta_{\gamma}^2 + \sum_{\gamma=1}^r \mu_{\gamma} \phi_{\gamma}. \quad (2)$$

Значення змінних ζ_{γ} і μ_{γ} представляють собою координати і імпульси сигналу управління, та розраховуються згідно системи Гамільтона [13, 14]

$$\dot{\zeta}_{\gamma} = -\partial H / \partial \mu_{\gamma}; \quad (3)$$

$$\dot{\mu}_{\gamma} = -\partial H / \partial \zeta_{\gamma}. \quad (4)$$

Для виразів (3) і (4) граничні умови формуються у вигляді виразів

$$\zeta_{\gamma}(0) = 0; \quad \mu_{\gamma}(T) = 0. \quad (5)$$

Сигнал управління $u(t)$ у дискретний час залежить від змінної ζ_{γ} при мінімумі функції H виразу (2):

$$H(\zeta_{\gamma}, u, t) \rightarrow \min. \quad (6)$$

Із перетворень виразів (3) і (4) відносно формули (2), можна записати, що функція сигналу управління $u(t)$ виразу (6) належить області обмеження рівня сигналу $|u(t)| \leq U_{max}$, та знаходиться після розв'язання рівняння

$$\partial H / \partial u = 0. \quad (7)$$

Розглянемо приклад синтезу сигналів управління каналу зв'язку БПЛА із врахуванням постійної часу T_0 каналу зв'язку [15]. Рівень сигналу управління обмежено умовою $|u(t)| \leq U_{max}$. Передатну функцію приймача каналу зв'язку БПЛА можна записати у вигляді виразу $\frac{k}{T_0 p + 1}$. Тоді сигнал управління $u(t)$ на виході приймача каналу зв'язку БПЛА $x(t)$ представлено у вигляді рівняння

$$\dot{x} = [k \cdot u - x] / T_0. \quad (8)$$

Значення параметрів каналу зв'язку БПЛА $b(t)$:

$$b(t) = \partial x(t) / \partial T_0. \quad (9)$$

Для обчислення значень $b(t)$ проведено диференціювання рівняння (8) за змінною T_0 .

Тоді можна записати вираз

$$\dot{b} = -\frac{1}{T_0^2} [k \cdot u - x] - \frac{b}{T_0}. \quad (10)$$

Порівняння отриманих формул (8) і (9) дозволяє записати

$$\zeta_1 = x; \quad \zeta_2 = b; \quad \phi_1 = \frac{1}{T_0} [k \cdot u - \zeta];$$

$$\phi_2 = -\frac{1}{T_0^2} [k \cdot u - \zeta] - \frac{\zeta_2}{T_0}.$$

Вираз (2) для H у цьому випадку перетворюємо до вигляду

$$H = -\frac{1}{2} \zeta_2^2 + \mu_1 \frac{k \cdot u - \zeta_1}{T_0} - \mu_2 \left[\frac{k \cdot u - \zeta_1}{T_0^2} + \frac{\zeta_2}{T_0} \right]. \quad (12)$$

Згідно виразу (6) розрахуємо параметри сигналу управління $u(t)$, при яких функція H має мінімальне значення. Величина сигналу управління має обмеження на рівень сигналу $|u(t)| \leq U$, тоді мінімум функції H для $u(t)$

$$u(t) = U \operatorname{sign} \left[\frac{k}{T_0^2} \mu_2 - \frac{k}{T_0} \mu_1 \right] = U \operatorname{sign}(\mu_2 - T_0 \mu_1). \quad (13)$$

Вираз (4) для змінних μ_1 і μ_2 перетворимо до вигляду

$$\dot{\mu}_1 = \frac{\partial H}{\partial \zeta_1} = \frac{1}{T_0} \mu_1 - \frac{1}{T_0^2} \mu_2;$$

$$\dot{\mu}_2 = -\frac{\partial H}{\partial \zeta_2} = \zeta_2 + \frac{1}{T_0} \mu_2 = b + \frac{1}{T_0} \mu_2. \quad (14)$$

Отримані вирази (8), (10), (12)–(14) є математичною основою синтезу сигналів управління каналу зв'язку БПЛА $u(t)$.

При цьому граничні умови сигналу управління мають вигляд

$$x(0) = b(0) = 0; \quad \mu_1(T) = \mu_2(T) = 0. \quad (15)$$

Із виразу (11) видно, що сигналу управління $u_{opt}(t)$ представляє собою кусково-постійну функцію, максимальний і мінімальний рівень якої дорівнює $\pm U$. Рівні сигналу управління мають розриви, які знаходяться у точках перемикання рівнів. Запропоновані формули (8), (10), (13), (14) дозволяють розрахувати дискретний час зміни рівнів сигналу час перемикання. Фізичний зміст рівнів перемикання – дискретний час, при якому функція $\mu_2(t) - T_0 \mu_1(t)$ змінює знак.

Розроблена математична основа синтезу сигналів управління каналу зв'язку БПЛА у вигляді рівнянь (8), (10), (12)–(14) із урахуванням граничних умов згідно виразу (15) дозволяє при часі дії сигналу управління T (при $T > T_0$) отримати декілька рішень. Ці рішення залежать від кількості та розміщення точок перемикання.

Тоді для отримання остаточного рішення задачі визначення параметрів сигналу управління $u_{opt}(t)$ пропонується, спочатку, знайти усі рішення, а, потім, визначити рішення, яке відповідає максимуму для функції потужності S .

Для методу динамічного програмування цікавим є випадок, коли функція $u(t)$ є імпульсною. Такий випадок можливо розглянути при використанні імпульсного управління БПЛА для забезпечення потрібного рівня прихованості операторів. Для такого випадку при використанні методу динамічного програмування у точці $t = T$ знаходиться оптимум (максимум або мінімум) функції

$$C(t) = \int_t^T \psi(x_\alpha, u, t) dt.$$

Для розрахунку використаємо вираз

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \min_{\{u\}} H. \quad (16)$$

Рівняння (16) є аналогом рівняння $\partial \dot{C} / \partial t = -H$. Функція C описується виразом $\dot{C}: C = -\dot{C} + const$, функція $\Psi(x_\alpha, u, t)$ відповідає функції Лагранжа, а значення змінних μ_γ – це імпульси імпульсного сигналу управління. Замість змінних μ_γ формули для H використаємо рівняння $\mu_\gamma = -\partial C / \partial \zeta_\gamma$. Тоді для початкової умови $C(T) = 0$ для змінної $C(t)$ отримаємо

$$C(t) = \frac{1}{2} \int_t^T \sum_{\gamma=r-m+1}^r \zeta_\gamma^2 dt.$$

Рівняння (16) перетворимо до вигляду

$$\begin{aligned} \frac{\partial C(t)}{\partial t} = & -\frac{1}{2} \sum_{\gamma=r-m+1}^r \zeta_\gamma^2 - \\ & - \max_{\{u\}} \sum_{\gamma=1}^r \frac{\partial C(t)}{\partial \zeta_\gamma} \phi_\gamma(\zeta_\gamma, u, t), \end{aligned} \quad (17)$$

де $C(\zeta_\gamma, T) = 0$ – початкова умова.

Для імпульсного сигналу управління для дискретного часу t_1, t_2, \dots, t_s метод динамічного програмування доцільно використовувати у програмних засобах. Тоді вираз (17) має вигляд

$$\begin{aligned} & C(t_{s-k})[\zeta_\gamma(s-k)] = \\ & = \frac{1}{2} \sum_{\gamma=r-m+1}^r \zeta_\gamma^2(s-k) \Delta t + \sup_{\{u(s-k)\}} C(t_{s-k+1}) \times \\ & \times \{ \zeta_\gamma(s-k) + \Delta t \phi_\gamma[\zeta_\gamma(s-k), u(s-k)] \}. \end{aligned}$$

Отриманий вираз дозволяє розрахувати параметри сигналу управління у дискретний час t_{s-k} залежно від змінних $\zeta_\gamma(s-k)$:

$$u_{omn}(s-k) = u_{omn}[\zeta_\gamma(s-k)]. \quad (18)$$

Змінні $\zeta_\gamma(s-k)$ можна обчислити із виразу

$$\begin{aligned} \zeta_\gamma(s-k+1) = & \zeta_\gamma(s-k) + \\ & + \Delta t \phi_\gamma[\zeta_\gamma(s-k), u_{omn}(\zeta_\gamma(s-k))] \end{aligned} \quad (19)$$

при з початковою умові згідно рівняння (5).

Рішення виразу (19) із урахуванням формули (18) дозволяє розрахувати параметри сигналів управління каналу зв'язку БПЛА $u_{omn}(t)$ від часу.

Висновки

Запропонований вираз (18) пропонується застосувати для розрахунку параметрів сигналів

управління каналу зв'язку БПЛА при безперервному контролі характеристик польоту. При такому випадку інтеграл формули (1) для змінної S замінюється інтегральною сумою.

Запропонований метод динамічного програмування при застосуванні у каналі зв'язку БПЛА програмних засобів має головну перевагу – дозволяє проводити розрахунки циклічних програм. Це дозволяє на кожному етапі при обчисленні використовувати тільки значення однієї функції $u_{omn}(\zeta_\gamma)$, але при значній кількості змінних ζ_γ (характерно для випадку контролю декількох БПЛА в одному секторі, тобто контролі значної кількості характеристик польоту) об'єм обчислень суттєво збільшується, що потребує збільшення технічної потужності каналу зв'язку БПЛА.

Метод динамічного програмування містить недолік – наявність декількох рішень, не завжди оптимальних. При цьому необхідно не втратити оптимальне рішення. Тому при розрахунках необхідно враховувати не тільки змінні $u(s-k)$, які характеризують максимум функції C_{s-k+1} , а й проміжні значення, для яких ця функція наближається до максимуму – змінні $u(s-k)$. Після обчислення всіх можливих рішень необхідно розрахувати таке, яке характеризує максимум функції $S - C_0[\zeta_\gamma(0)] = C_0(0)$.

Метод динамічного програмування при синтезі сигналів управління каналу зв'язку БПЛА $u_{omn}(t)$ дозволяє обчислювати параметри сигналу для дискретного часу, то це дозволяє враховувати обмеження на сигнал управління у дискретному часі, тобто враховувати дію засобів радіоелектронної протидії та радіотехнічних завад для локального сектору функціонування каналу зв'язку БПЛА. Такі випадки розглядають накладання обмежень не на сигнал управління $u(t)$, а на сигнал $x_i(t)$ на виході приймача каналу зв'язку БПЛА. Якщо вплив здійснюється одночасно на сигнал управління $u(t)$ і сигнал на виході приймача каналу зв'язку БПЛА $x_i(t)$, тоді обчислення параметрів сигналу управління потребує розв'язання задачі з обмеженими вхідними даними. Запропонований метод динамічного програмування синтезу сигналів управління каналу зв'язку БПЛА пропонується використовувати для забезпечення стійкого та надійного управління БПЛА при дії засобів радіоелектронної протидії та радіотехнічних завад.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Герасимов С. В., Гричанюк А. М., Журавльов О. О. Дослідження високоточних систем навігації літальних апаратів за наземними орієнтирами. 36. наук. пр. Харківського національного університету Повітряних Сил. Харків. 2017. Вип. 5 (54). С. 48-53. URL: <https://journal-hnups.com.ua/index.php/zhups/issue/archive/2>
2. Беляєвський Л.С. Теоретичні основи радіонавігації та радіонавігаційних систем. К.: КМУЦА, 1997. 442 с. URL: <https://dokumen.pub/9e89bac0efee1cd81ed76d635b9fe15a.html>

3. Герасимов С. В., Чернявський О. Ю., Нанівський Р. А., Ільків І. М., Смичок В. Д. Комплектування полігону навчально-тренувальними комплексами для підготовки операторів безпілотних летальних апаратів. Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). 2023. № 2 (20). С. 63-72. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2023.20.63-72>
4. Yevseiev S., Kuzniyev O., Herasimov S. et. al. Development of an optimization method for measuring the Doppler frequency of a packet taking into account the fluctuations of the initial phases of its radio pulses. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 2/9 (110). 2021. Pp. 6-15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229221>
5. Zumbege J. F., Heflin M. B., Jefferson D. C., Watkins M. M., Webb F. H. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Geoph Research. Vol. 102, No B3. 1997. Pp. 5005-5017. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/96jb03860>
6. Герасимов С. В. Модель оцінки похибки обробки інформації у навігаційних системах крилатих ракет в умовах невизначеності. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. Харків, 2019. № 2 (35). С. 151-157. <https://doi.org/10.30748/nitps.2019.35.19>
7. Сучасне озброєння і військова техніка Збройних Сил Російської Федерації. Довідник учасника ООС / [С. П. Корнійчук, О. В. Турінський, Г. В. Певцов, та ін.]; за заг. ред. С. П. Корнійчука. Х.: ДІСА ПЛІОС, 2020. 1220 с. URL: https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2022/06/2_5263006830929386204.pdf
8. Аврутов В. В., Аврутова І. В., Попов В.М. Випробування приладів і систем. Види випробувань та сучасне обладнання. Київ : НТУУ “Київський політехнічний інститут”, 2009. 64 с. URL: https://cions.kpi.ua/Arhiv/vyprob_sec.pdf
9. Герасимов С.В., Чернявський О.Ю., Томчук О.А., Болкот П.А., Мартиненко С.А. Обладнання полігону навчально-тренувальними комплексами для збільшення дальності дії систем управління безпілотних апаратів. Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). 2024. № 1 (21). С. 77-86. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2024.21.77-86>
10. Асавалюк А. В., Герасимов С. В., Рошчупкін Є. С. Похибки визначення повного вектора швидкості в єдиній прямокутній системі координат системою оглядових станцій радіолокації з різною точністю. Системи озброєння і військова техніка. Харків, 2017. Вип. 2 (50). С. 53-56. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_vt_2017_2_13
11. Herasimov S. Measures of efficiency of dimensional control under technical state designation of radio-technical facilities / S. Herasimov, Yu. Shapran, M. Stakhova // Системи обробки інформації. 2018. Вип. 1. С. 148-154. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2018_1_23
12. Xu Guochang. GPS. Theory, algorithms and applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. 2003. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-72715-6>
13. Synergy of building cybersecurity systems: monograph / S. Yevseiev, V. Ponomarenko, O. Laptiev, O. Milov and others. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 2021. 188 p. https://papers.ssrn.com/sol3/cf_dev/AbsByAuth.cfm?per_id=4700333
14. Yevseiev S., Milevskiy S., Sokol V. and others. Development of functionality principles for the automated data transmission system through wireless communication channels to ensure information protection. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. № 4(9) (130). С. 18-33. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310547>
15. Herasimov S, Borysenko M., Roshchupkin E. and etc. Spectrum Analyzer Based on a Dynamic Filter, J Electron Test. 2021. Pp. 357-368. <https://doi.org/10.1007/s10836-021-05954-0>

Received (Надійшла) 22.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Костяк Марина Юрїївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри захисту інформації, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна;

Maryna Kostiak – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Protection, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine;

e-mail: maryna.y.kostiak@lpnu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-6667-7693>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57686638700>.

Снявський Орест Юрїївич – аспірант кафедри захисту інформації, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна;

Orest Syniavskiy – PhD student, of the Department of Information Protection Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine;

e-mail: orest.y.syniavskiy@lpnu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0004-0202-6148>.

Discrete-casual modeling of elementary functions of operations controlled by information

Maryna Kostiak, Orest Syniavskiy

Abstract. Relevance. The need to protect the communication channel when controlling UAVs from electronic countermeasures and radio interference to expand the possibilities of their use. **Object of research:** control signals of UAV communication channels. **Purpose of the article.** development of a method for synthesizing the control signal of UAV communication channels using a dynamic programming device. **Research results.** The article proposes a dynamic programming method for synthesizing control signals of UAV communication channels. The developed method allows calculating the parameters of the control signal for both discrete and continuous observation time. This approach allows taking into account restrictions on the control signal in discrete or continuous time, i.e., taking into account the effect of electronic countermeasures and radio interference for the local sector of operation of the UAV communication channel. **Conclusions.** The proposed method of dynamic programming of synthesis of control signals of the UAV communication channel is proposed to be used to ensure stable and reliable control of the UAV under the influence of electronic countermeasures and radio interference.

Keywords: UAV; means; security; information; communication channel; mathematical model; synthesis; observation; electronic countermeasures; radio interference; control.

Л. І. Леві, О. С. Фомін, Д. Р. Олексієнко

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

ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОПЕРАТИВНО КЕРОВАНИХ ІЄРАРХІЧНО ОРГАНІЗОВАНИХ ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖНИХ СИСТЕМ

Анотація. На основі спеціальних соціологічних досліджень встановлено, що досягнення високого рівня інженерного забезпечення житлових будинків, а також побутових підприємств і установ сприяє підвищенню санітарно-гігієнічного рівня, має виключно позитивний вплив на стан здоров'я населення та на продуктивність праці, тим самим сприяючи розв'язанню важливих народногосподарських завдань. Важливим аспектом зазначеної проблеми є вдосконалення функціонування сучасних міських систем водо- та газопостачання для забезпечення необхідних режимів споживання води та газу побутовими об'єктами, а також об'єктами соціально-культурного призначення. Необхідність подальшого вдосконалення сільськогосподарського виробництва та поліпшення побутових умов сільського населення висуває підвищені вимоги до реалізації процесів функціонування зрошувальних систем, а також систем сільськогосподарського водопостачання. Це зумовлено необхідністю забезпечення потрібних режимів поливу на зрошуваних полях, а також необхідних режимів споживання води об'єктами сільськогосподарського призначення та побутовими об'єктами. Згідно з [1 – 4], системи водо- і газопостачання, а також зрошувальні та вентиляційні системи можна класифікувати як ієрархічно структуровані інженерні мережні системи (ІМС). Аналіз існуючих і проєктованих ІМС свідчить про те, що такі системи можуть бути представлені у вигляді сукупності взаємопов'язаних і взаємодіючих у процесі функціонування локальних мереж (ЛМ) різних ієрархічних рівнів. Зокрема, на вищому рівні ієрархії до складу ІМС входять магістральні мережі (ММ), які об'єднують підключені до них розподільчі мережі (РМ), що належать до нижчих рівнів. Основні характеристики та специфічні властивості ЛМ різного рівня, як складових частин оперативно керованих ієрархічних інженерних мережних систем, детально проаналізовані у роботах [1 – 4]. Виходячи з поставленої проблеми, стаття спрямована на дослідження математичних моделей і комп'ютерних реалізацій для розв'язання таких ключових задач оптимізації структурних компонентів ІМС: оптимальне прокладання магістральних каналів (МК), що формують ММ у складі оперативно керованих зрошувальних систем як різновиду ІМС; оптимізація топологічної структури окремих оперативно керованих ЛМ.

Ключові слова: інженерні мережні системи, локальні мережі, магістральні мережі, розподільчі мережі, магістральні канали, ієрархічна структура, найкоротша ланцюгова траєкторія, «поглинаючий» алгоритм.

Вступ

Постановка проблеми. Відповідно до [1 – 4], системи водо- та газопостачання, а також зрошувальні й вентиляційні системи можуть бути віднесені до класу ієрархічно організованих інженерних мережних систем (ІМС).

На підставі аналізу існуючих та проєктованих ІМС можна зробити висновок, що такі об'єкти можуть бути декомпозовані на певним чином взаємопов'язані та взаємодіючі між собою у процесі функціонування окремі локальні мережі (ЛМ) різного рівня ієрархії.

При цьому реальні ІМС на вищому рівні ієрархії як ЛМ містять магістральні мережі (ММ), до яких підключені ЛМ нижчих рівнів ієрархії – розподільчі мережі (РМ).

Найважливіші властивості та особливості, характерні для окремих ЛМ різного рівня ієрархії як структурних елементів оперативно керованих ієрархічно організованих інженерних мережних систем розглянуто в [1 – 4].

Формулювання мети статті. Відповідно до постановки проблеми, розглянемо математичні моделі та комп'ютерні реалізації наступних задач оптимізації найважливіших структурних елементів ІМС:

- оптимізація трасування магістральних каналів (МК) як ММ оперативно керованих зрошувальних систем у якості ІМС;
- оптимізація топологічної структури окремих оперативно керованих ЛМ.

Оптимізація трасування магістральних каналів оперативно керованих зрошувальних систем

Нехай необхідно від заданого пункту споживання цільового продукту (ЦП) (води) із зовнішнього середовища побудувати магістральний канал (МК) зрошувальної системи до однієї з кількох можливих вершин розподільчої системи (РС), що знаходиться на наступному, нижчому рівні ієрархії. Для забезпечення подачі ЦП буде потрібно певна кількість насосних станцій, які є активними елементами (АЕ) оперативно керованої зрошувальної системи.

Кожен АЕ може розташовуватись на одній із доступних для будівництва ділянок місцевості. Обмеження в даному випадку можуть бути зумовлені складними фізико-географічними умовами місцевості, наявністю інших споруд, а також міркуваннями, пов'язаними з охороною навколишнього середовища [1 – 4].

Передбачається, що для будь-якої пари суміжних АЕ відомі витрати на спорудження інцидентної їм частини можливого варіанта МК зрошувальної системи.

Задача оптимізації трасування магістрального каналу (МК) оперативно керованої зрошувальної системи, що розглядається в цій роботі, формулюється таким чином.

Необхідно при заданому розташуванні пунктів споживання ЦП з зовнішнього середовища визначити таке допустиме розміщення активних елементів

(AE), яке мінімізує загальні витрати на будівництво МК зрошувальної системи.

З метою формалізації поставленої на змістовному рівні задачі введемо такі позначення.

Мережу можливих варіантів магістрального каналу (МК) подамо за допомогою моделюючого графа G , який має множину вершин V і дуг E , де кожна дуга $e \in E$ відповідає впорядкованій парі вершин (i, j) , де $i, j \in V$.

Вершину, що відповідає пункту споживання ЦП із зовнішнього середовища МК зрошувальної системи, позначимо як S і назовемо її головним джерелом.

Вершину розподільчої мережі з множини можливих вершин, до якої передбачається підключення МК, позначимо як t і назовемо її головним стоком.

Кожній дузі e поставимо у відповідність величину C_{ij} , що виражає вартість будівництва частини МК, яка з'єднає відповідні вузли мережі можливих варіантів.

У цій формалізації задача оптимізації трасування МК оперативно керованої зрошувальної системи зводиться до задачі знаходження найкоротшого шляху з вершини S до вершини t на моделюючому графі G [1 – 4].

Машинні програми, що чисельно реалізують цю задачу, базуються на алгоритмі Дейкстри, який враховує специфіку розглядуваної моделі [1 – 4].

Основу алгоритму становить положення про те, що якщо відома найкоротша ланцюгова траєкторія з вузла S до вершини j і вершина K належить цій траєкторії, то найкоротша траєкторія з S до K є частиною початкової траєкторії, що закінчується у вузлі K . Ініціалізація алгоритму здійснюється при $j=S$, далі значення j поетапно збільшується на одиницю, і при $j=t$ алгоритм завершує роботу.

Призначення програми, що реалізує алгоритм Дейкстри, полягає у знаходженні найкоротшого шляху від джерела до будь-якого іншого вузла мережі.

Оптимізація топологічної структури оперативно керованих локальних мереж

Відповідно до [1 – 4], оптимізація топологічної структури оперативно керованих ЛС повинна здійснюватися з урахуванням наступних техніко-економічних умов:

1. Мінімізація загальних витрат на спорудження ЛС.

2. Мінімізація загальних витрат на експлуатацію ЛС.

Мінімізація загальних витрат на спорудження ЛС може бути досягнута шляхом реалізації наступних заходів [1 – 4]:

1. Мінімізація обсягу будівельних робіт.

2. Мінімізація витрат будівельних і конструкційних матеріалів.

Мінімізація загальних витрат на експлуатацію ЛС може бути досягнута шляхом реалізації наступних умов [1 – 4]:

1. Мінімізація загальної кількості елементів (ділянок) розглядуваної ЛС.

2. Мінімізація загальних енергетичних втрат при транспортуванні ЦП по ділянках і його перерозподілі в вузлах розглядуваної ЛС.

У цьому підрозділі розглянемо можливий підхід до оптимізації топологічної структури оперативно керованих ЛС, що враховує перераховані вимоги. В цьому сенсі розглядуваний підхід є логічним продовженням та розвитком підходу до оптимізації трасування МК оперативно керованих зрошувальних систем, наведеного в попередньому підрозділі цієї роботи.

Аналіз існуючих та проєктованих ЛС дозволяє зробити висновок, що для об'єктів розглядуваного класу зазвичай відоме розташування вузлів (вершин), в яких з'єднуються їхні ділянки (дуги) [1 – 4]. Для реалізації свого функціонального призначення та задоволення перерахованим вимогам, проєктована ЛС повинна мати такі властивості:

1. Бути зв'язною.

2. Містити всі задані вузли (вершини).

3. Містити мінімальну кількість ділянок (дуг).

4. Мінімізувати суму узагальнених вартісних оцінок (узагальнених довжин) цих дуг.

На основі теоретико-графового аналізу, проведеного відповідно до [1 – 4], можна зробити висновок, що ЛМ, що мають зазначені властивості, можуть бути формалізовані як найкоротші остовні дерева. Тому для оптимізації топологічної структури оперативно керованих ЛМ пропонується використовувати відому задачу про найкоротше остовне дерево.

Постановка цієї задачі відповідно до [1 – 4] передбачає наступну формалізацію. Виділимо в ІМС певну ЛМ M , яку формалізуємо остовним деревом T , що має n вершин, які належать множині S . Вершини остовного дерева T відповідають вузлам ЛМ M .

Остовним деревом T називається зв'язний граф, що складається з $n-1$ дуг і n вершин. Дуги дерева T відповідають ділянкам ЛМ M .

З будь-якої власної підмножини множини S може бути утворено дерево, яке, однак, може не бути остовним деревом початкової ЛМ M .

Припустимо, що кожній дузі (i, j) , що з'єднає вершини i та j ЛС M , відповідає величина C_{ij} , яка виражає узагальнену вартісну оцінку (узагальнену довжину) розглядуваної дуги (i, j) , породжувану загальними витратами на спорудження та експлуатацію відповідної ділянки ЛМ M , де $i, j \in S$.

Найкоротшим остовним деревом називається таке остовне дерево ЛМ M , яке має мінімальну суму узагальнених вартісних оцінок C_{ij} усіх його дуг (i, j) , де $i, j \in S$.

Множина можливих варіантів топологічної структури розподільчої мережі (РМ) зрошувальної системи приведена на рис. 1.

Відповідно до [5, 6], задача про найкоротше остовне дерево є задачею дослідження операцій, яку можна розв'язати за допомогою «поглинаючого» алгоритму. Цей процес починається з вибору довільної вершини ЛМ M і найкоротшої дуги з множини дуг, що з'єднують вибрану вершину з іншими вершинами.

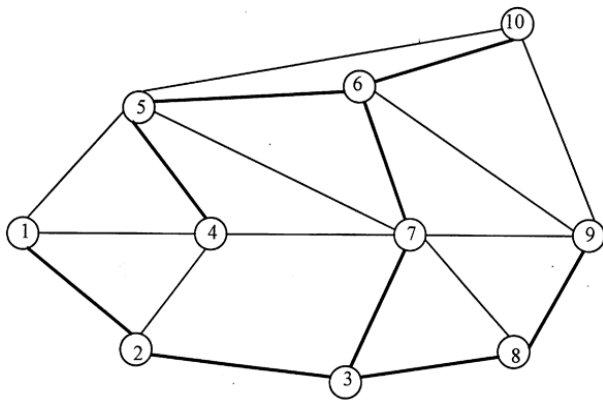


Рис. 1. Множина можливих варіантів топологічної структури розподільчої мережі зрошувальної системи

Після з'єднання двох вершин вибраною дугою визначається найближча вершина до цих двох. Потім ця вершина та відповідна їй дуга додаються до шуканого остовного дерева. Зазначений процес триває доти, доки всі вершини не буде з'єднано між собою.

Алгоритм, заснований на «поглинанні» найкоротших дуг, згідно з [5, 6], може бути формалізований таким чином.

1. Використовуючи вершини дерева T , визначаються такі дві множини: S – множина з'єднаних вершин, \bar{S} – множина нез'єднаних вершин. На початку всі вершини належать множині \bar{S} .

2. Вибирається довільна вершина з множини \bar{S} і з'єднується з найближчою сусідньою вершиною. Після виконання цього кроку множина \bar{S} міститиме дві вершини.

3. Серед усіх дуг, що з'єднують вершини множини S з вершинами множини \bar{S} , обирається найкоротша дуга. Кінцева вершина цієї дуги, що належить множині \bar{S} , позначається як δ . Вершину δ видаляють з множини \bar{S} і додають до множини S .

4. Крок 3 виконується доти, доки всі вершини не належатимуть множині S .

Узагальнені вартісні оцінки дуг мережі можливих варіантів топологічної структури РМ зрошувальної системи, топологічна структура якої формалізована за допомогою рис. 1, наведено в табл. 1.

Узагальнені вартісні оцінки дуг мережі оптимального варіанту топологічної структури РМ зрошувальної системи, топологічна структура якої формалізована за допомогою рис. 1 та узагальнені вартісні оцінки дуг мережі можливих варіантів топологічної структури РМ зрошувальної системи містяться в табл. 1, наведено в табл. 2.

Висновки

1. Для оптимізації трасування МК в оперативно керованих зрошувальних системах доцільно використати задачу знаходження найкоротшого ланцюга на моделюючому графі можливих варіантів трасування МК. Для синтезу машинних програм пакету мережевої оптимізації, призначеного для

чисельної реалізації поставлених задач, доцільно застосувати алгоритм Дейкстри з урахуванням специфіки даних задач.

Таблиця 1 – Узагальнені вартісні оцінки дуг мережі можливих варіантів топологічної структури РМ зрошувальної системи

(i, j)	C_{ij}	(i, j)	C_{ij}
(1, 2)	2,1	(5, 6)	1,2
(1, 4)	2,7	(5, 7)	2,1
(1, 5)	3,6	(5, 10)	3,3
(2, 3)	1,2	(6, 7)	1,5
(2, 4)	1,8	(6, 9)	2,7
(3, 4)	2,1	(6, 10)	1,2
(3, 7)	0,6	(7, 8)	2,7
(3, 8)	1,8	(7, 9)	2,4
(4, 5)	1,8	(8, 9)	0,9
(4, 7)	3,0	(9, 10)	3,0

Таблиця 2 – Узагальнені вартісні оцінки дуг мережі оптимального варіанту топологічної структури РМ зрошувальної системи

(i, j)	C_{ij}	(i, j)	C_{ij}
(1, 2)	2,1	(5, 6)	1,2
(2, 3)	1,2	(6, 7)	1,5
(3, 7)	0,6	(6, 10)	1,2
(3, 8)	1,8	(8, 9)	0,9
(4, 5)	1,8	-	-

З метою оптимізації топологічної структури оперативно керованих ЛМ, що є складовою частиною ієрархічно організованих ІМС, з урахуванням вимог до їхньої конструкції та експлуатації, доцільно використати задачу про найкоротше остовне дерево. Відтак, для реалізації цього підходу доцільно застосувати програмний пакет мережевої оптимі-

зації, який ефективно виконує розв'язання зазначеної задачі за допомогою «поглинаючого» алгоритму.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би

вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Леві Л.І. Застосування комбінаторно-графового підходу до оперативного управління інженерними мережами // Л.І. Леві, М.К. Бороздін, О.С. Ястреба // Системи управління, навігації та зв'язку. Зб. наукових праць. Вип. 2 (76), 2024. – С. 44–46. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.2.044>
2. Поліщук Д. О., Яджак М. С. Мережеві структури та системи: Ієрархії та мережі // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2018. – № 4. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2018.4.07>
3. Robson C., Barr S., Ford A. The structure and behaviour of hierarchical infrastructure networks // Applied Network Science, 2021, 6:65. <https://doi.org/10.1007/s41109-021-00404-4>
4. Wang C., Huang N., Zhang S. та ін. A hierarchical network model for network topology design using genetic algorithm // MATEC Web of Conferences (2017), Vol. 119. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711901008>
5. Hillier, F. S., Lieberman, G. J. (2021). Introduction to Operations Research (11th ed.). McGraw-Hill. URL: <https://www.mheducation.com/highered/product/introduction-operations-research-hillier/M9781259872999.html>
6. Korte, B., Vygen, J. (2022). Combinatorial Optimization: Theory and Algorithms (6th ed.). Springer. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56074-5>

Received (Надійшла) 25.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Леві Леонід Ісаакович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматичної, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;

Leonid Lievi – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Automation, Electronics and Telecommunications, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine;

e-mail: levili@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-4619-8764>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58632914200>.

Фомін Олександр Сергійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматичної, 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; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0005-3487-9062>.

Олексієнко Денис Русланович – аспірант кафедри автоматичної, електроніки та телекомунікацій Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;

Denis Oleksiienko - postgraduate of the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine.

e-mail: denqueeisafk@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0002-5066-0421>.

Optimization of structural elements of operationally controlled hierarchically organized engineering network systems

Leonid Lievi, Olexandr Fomin, Denis Oleksiienko

Abstract. Based on special sociological research, it has been established that achieving a high level of engineering support for residential buildings, as well as household enterprises and institutions, contributes to improving the sanitary and hygienic level, has an exclusively positive effect on the health of the population and on labor productivity, thereby contributing to the solution of important national economic tasks. An important aspect of this problem is the improvement of the functioning of modern urban water and gas supply systems to ensure the necessary modes of water and gas consumption by household objects, as well as objects of socio-cultural purpose. The need to further improve agricultural production and improve the living conditions of the rural population puts forward increased requirements for the implementation of the processes of functioning of irrigation systems, as well as agricultural water supply systems. This is due to the need to ensure the necessary irrigation modes on irrigated fields, as well as the necessary modes of water consumption by agricultural objects and household objects. According to [1 – 4], water and gas supply systems, as well as irrigation and ventilation systems, can be classified as hierarchically structured engineering network systems (ENS). Analysis of existing and designed ENS shows that such systems can be represented as a set of interconnected and interacting local networks (LN) of different hierarchical levels that function. In particular, at the highest level of the hierarchy, the ENS includes trunk networks (TN), which unite the distribution networks (DN) connected to them, belonging to lower levels. The main characteristics and specific properties of LNs of different levels, as components of operationally managed hierarchical engineering network systems, have been analyzed in detail in the works [1 – 4]. Based on the problem posed, the article is aimed at studying mathematical models and computer implementations to solve the following key tasks of optimizing the structural components of ENS: optimal laying of main channels (MC) that form TNs as part of operationally controlled irrigation systems as a type of ENS; optimization of the topological structure of individual operationally controlled LNs.

Keywords: engineering network systems, local networks, backbone networks, distribution networks, backbone channels, hierarchical structure, shortest chain trajectory, "absorbing" algorithm.

Olena Lozko¹, Volodymyr Lysechko¹, Illia Syvolovskyi², Vasyl Pastushenko³

¹ Ivan Kozhedub Kharkiv National University of Air Forces, Kharkiv, Ukraine

² National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine

³ Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine

METHOD OF MULTI-CRITERIA OPTIMISATION OF DATA FLOW DISTRIBUTION IN SELF-ORGANISED TELECOMMUNICATIONS NETWORKS

Abstract. Relevance. Self-organising networks operate under variable topology and resource availability. It is necessary to jointly reduce delay and load imbalance while increasing resilience to failures and topology changes. This requires adaptive optimisation with near real-time decision-making. **Object of the study:** distribution processes of complex-structured data flows in self-organising telecommunications networks under node resource constraints. **Purpose of the article:** to develop a multi-criteria optimisation method for flow distribution that jointly reduces delay and load imbalance and increases resilience to failures and topology changes, taking into account heterogeneous QoS requirements and limited node resources. **Research results.** Each flow is represented as a set of subflows with heterogeneous QoS requirements. The limitations of computational and bandwidth resources of nodes are formalised as a multidimensional knapsack problem. The optimisation loop combines global evolutionary search with local refinement of solutions. Adaptive route restructuring is applied in response to traffic variability and network state changes. Simulation results confirm a reduction in inter-cluster and end-to-end delays, a decrease in critical-flow delays, improved load distribution uniformity, and shorter convergence time after topology changes. At the same time, the method increases the frequency of route reconfigurations and the computational cost of the optimisation cycle, and degrades the performance of low-priority flows, which is interpreted as a controlled compromise inherent to multi-criteria optimisation. **Conclusions.** The proposed method improves the efficiency of flow distribution in dynamic self-organising networks, providing the greatest benefits for critical flows and convergence after topology changes. The improvement is achieved at the cost of higher computational overhead and more frequent route reconfigurations, with reduced performance for low-priority flows. The method is suitable for Fog, Edge, and Cloud environments where adaptive real-time decisions are required under topology changes and resource variability.

Keywords: self-organising telecommunications networks; multi-criteria optimisation; data flow distribution; load balancing; multidimensional knapsack problem; evolutionary algorithms; resource optimisation.

Introduction

The purpose of the work. The development of telecommunications technologies has led to the emergence of systems in which traditional centralized resource management schemes no longer provide adequate efficiency. In practice, distributed and self-organised telecommunications systems are increasingly being used, characterised by the absence of a single decision-making centre; heterogeneity of computing network resources; high data flow dynamics; and multi-criteria service requirements [1, 2].

In related studies, the problem of improving the efficiency of self-organised telecommunications systems is considered from different perspectives. In works devoted to hierarchical clustering of distributed network nodes, graph-based methods for cluster formation are proposed, which allow reducing topology fragmentation and inter-cluster delays. Such approaches improve the structural organisation of the network, but do not solve the problem of optimal distribution of flows within clusters [3, 4].

Another area of research focuses on selecting and maintaining a coordinator or master node for the cluster. The proposed methods of local rating selection and gossip exchange metrics ensure rapid recovery of control in case of failures and reduce service traffic compared to classical selection algorithms. However, such methods do not take into account the multi-criteria optimisation of the distribution of complex data flows [5].

A separate group consists of works devoted to predictive-adaptive control of coordinator stability in

Fog/Edge environments, where neural network models are used to predict node degradation. They allow proactive responses to load growth or failure risk, but do not consider the detailed distribution of flows and sub-flows, taking into account multidimensional resource constraints.

Classic routing and load balancing models are designed primarily to work with aggregated flows, which are described by a small number of parameters – volume, arrival rate, and acceptable delivery time. However, modern systems produce complex structured data flows (CSD flows), which have a hierarchy of sub-flows with different characteristics [1–3]. For example, an analytical flow may contain telemetry traffic, video data, service messages, and local computation results – each of these components has its own requirements for latency, throughput, and reliability.

In practical scenarios with high structural complexity of traffic, the application of these methods leads to a decrease in decision-making accuracy, local distribution optimisation, and degradation of service quality indicators. This is because they are focused on aggregated flows, take into account a limited number of criteria, and do not support the multidimensional resource constraints characteristic of modern self-organising networks.

Complexly structured data flows have a hierarchical nature, which significantly affects the process of optimising their distribution in self-organised networks. Recent studies have shown that taking into account the internal structure of flows provides significantly higher load balancing accuracy and reduces delays in heterogeneous networks [6, 7].

A matrix is introduced for the formal description of internal dependencies:

$$D = [d_{ij}], d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } f_i \text{ depends on } f_j, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

The existence of dependencies between sub-threads imposes additional constraints on the permissible solution space in the optimisation problem. For example, a high-priority sub-thread that depends on the results of a previous sub-thread cannot be assigned to a node that is too far away or has insufficient bandwidth to interact with the predecessor node. In video analytics systems, such constraints can affect the quality of event recognition, and in industrial systems, they can affect the accuracy of early warning systems.

Well-known sources indicate that modelling flows with dependencies can reduce average latency by up to 35% and improve resource utilisation uniformity in multi-level topologies. Thus, formalising dependencies is a key factor in developing an optimisation method for CSD-flow [8, 9].

Thus, the current scientific problem is to create a method for distributing complexly structured data flows that simultaneously takes into account the internal structure of flows, multidimensional resource constraints of nodes, and the dynamic nature of self-organised networks. Existing approaches are either limited to optimising aggregated traffic or solve individual control sub-tasks without providing comprehensive multi-criteria distribution of sub-flows in real time.

Thus, there is a need to create a model capable of reflecting the internal structure of flows, as well as optimisation methods that simultaneously take into account several criteria and adapt to changes in network topology in real time.

Statement of the problem. In modern telecommunications systems, traffic distribution is traditionally modelled through routing, latency minimisation, or load balancing tasks between nodes. With the growing number of sub-flows and the variability of their requirements, classical routing and load balancing models lose their scalability because they do not ensure coordination of decisions at the level of individual flow components.

Multi-criteria optimisation methods have been developed due to the ability to simultaneously consider several service requirements [6]. Second- and third-generation evolutionary algorithms, such as NSGA-II and NSGA-III, allow the formation of a set of non-dominated solutions, giving the operator or system a choice between different compromises. Their advantage is scalability to tasks with a large number of criteria and no requirement for prior determination of weighting coefficients. However, their disadvantage is that they are focused on the distribution of aggregated traffic units and do not take into account the complex internal structure of CSD-flow.

Analysis of recent studies and publications. In Fog and Edge computing systems, the problem of optimal service placement is often considered in the context of minimising latency between the data generation point and the processing point. However, most

models place tasks or services rather than sub-threads, which differs significantly from real-world telecom conditions. In such networks, computing resources are distributed among numerous heterogeneous nodes, and each subthread may have a unique route and different requirements. Therefore, it is important to build a model that allows simultaneous optimisation of routing, placement, and resource allocation based on multidimensional constraints.

A separate area is combined approximate optimisation algorithms, which combine global search and local improvement. Evolutionary algorithms provide a wide range of solutions, while local methods (hill climbing, simulated annealing, tabu search) allow for high accuracy in improving intermediate results. Hybrid methods are actively used for multidimensional problems, including MKP (Multi-dimensional Knapsack Problem), since classical LP/MIP methods are too slow with a large number of dimensions and nonlinear constraints.

Combined multi-criteria optimisation algorithms with local improvement are one of the key approaches to optimisation tasks in complex telecommunications systems [4, 5, 7]. The combination of an evolutionary core, which provides global search, with local optimisation techniques, which are responsible for the precise refinement of local solutions, allows high convergence to be achieved even in high-dimensional problems. One of the advantages of such methods is their ability to adapt to load changes in real time, making them a natural choice for self-organising networks, where traffic structure changes continuously.

Thus, modern approaches either oversimplify the mathematical model, fail to take into account the interdependence of subflows, or are unable to adapt to dynamic changes in self-organised networks. This justifies the need to improve the developed methods, which combine multidimensional optimisation, detailed flow structure modelling, and an adaptive combined optimisation algorithm.

In real Fog, Edge, and Cloud environments, the proposed method can be implemented as a sequential control loop. At the first stage, the status of nodes and communication channels is monitored, and current resource profiles are generated. Next, the network is logically organised into clusters with limited internal delays, which reduces the dimensionality of the optimisation problem.

At the level of each cluster, a coordinator is selected to provide local control and initiate the process of multi-criteria distribution of sub-threads. The optimisation module, based on a multidimensional knapsack problem and a combined approximate optimisation algorithm, generates a plan for assigning sub-threads to nodes, taking into account QoS requirements. In the event of a change in load or node degradation, re-optimisation takes place without stopping the system [10].

Main material

The optimisation model for sub-flow distribution is based on a multidimensional knapsack problem, which is widely used in modern research to describe resource

constraints in distributed systems [11, 12]. The multidimensional knapsack problem is defined as:

$$\max \sum_{i=1}^n v_i x_i, \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^n w_{ik} x_i \leq C_k, k = 1, \dots, K, x_i \in \{0,1\}. \quad (3)$$

In the context of self-organised telecommunications networks: w_{ik} – determine resource consumption by sub-thread f_i , including CPU, RAM, power consumption, and channel bandwidth; C_k – maximum capabilities of the corresponding node resource; v_i – integral utility of a sub-flow, formed on the basis of QoS criteria.

Based on NSGA-II/III approaches and Fog/Edge models, the utility of a sub-thread can be defined as follows [6]:

$$v_i = \alpha_1 \cdot \frac{1}{T_i} + \alpha_2 \cdot B_i + \alpha_3 \cdot (1 - L_i) + \alpha_4 \cdot P_i. \quad (4)$$

where T_i – delay; B_i – bandwidth; L_i – loss rate; P_i – priority.

The proposed formalisation allows obtaining an admissible sub-flow assignment plan in which each decision satisfies the set of resource constraints of nodes and QoS requirements for each sub-flow. [4, 7]. Let

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}, \quad (5)$$

a set of sub-threads that make up a single complex-structured thread.

Each subthread f_i has the following attributes: d_i – data volume; r_i – resource requirements (CPU, memory); τ_i – acceptable delay; p_i – priority; b_i – required channel bandwidth; e_i – energy cost of sub-stream processing.

A complexly structured flow is represented as a set of sub-flows, each of which may have requirements that are independent or partially dependent on other sub-flows. This allows for a more accurate load distribution model. For example, video analytics flows may include high-resolution traffic, service management traffic, low resource requirements but high priority, as well as processing result traffic. The network consists of nodes

$$N = \{n_1, n_2, \dots, n_m\}. \quad (6)$$

The resource constraints of node n_j are given as

$$C_{jk}, k = 1, 2, \dots, K, \quad (7)$$

where k – denotes the type of resource: computing power, memory, bandwidth, energy consumption, etc.

Purpose of the sub-thread f_i per node n_j described by a binary variable:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } f_i \text{ performed on } n_j, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (8)$$

Resource constraints are formulated as:

$$\sum_{i=1}^n w_{ijk} x_{ij} \leq C_{jk}, \quad (9)$$

where w_{ijk} – required amount of resources k for sub-thread i at node j .

Since node resources are multidimensional (CPU, memory, bandwidth, energy), the problem is formulated as a knapsack problem, where the number of dimensions

k is equal to the number of resource types [13, 14]. The resource constraints of a self-organised network are presented in a multidimensional form and include the computational, bandwidth, memory, and energy parameters of the nodes [15, 16]. The sub-thread assignment problem is formulated as a multidimensional knapsack problem, which allows several types of constraints to be taken into account simultaneously for each node and correctly reflects the heterogeneity of resources in Fog/Edge/Cloud infrastructures [17–19].

This method is optimised according to the following criteria: minimising average delay; minimising load imbalance; and maximising service quality:

$$\max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_{ij} x_{ij}, \quad (10)$$

$$v_{jk} = \alpha_1 QoS_{ij}^{delay} + \alpha_2 QoS_{ij}^{bw} + \alpha_3 QoS_{ij}^{loss} + \alpha_4 Pri_i, \quad (11)$$

where α_k are the weight coefficients of the criteria.

This expression allows several independent optimisation criteria to be integrated into the model.

The multidimensional knapsack problem remains NP-hard already for the two-dimensional case, and its computational difficulty grows rapidly with the number of items and constraint dimensions [20]. In Fog/Edge environments, the amount of sub-threads may scale to hundreds or even thousands, while the resource vector typically includes several components (e.g., CPU, RAM, bandwidth, energy, and additional operational limits), which may increase the number of dimensions to 4–8 [21]. As a result, the search space becomes extremely large. Exact approaches such as linear/integer programming and dynamic programming-based schemes often exhibit exponential or pseudo-exponential growth of computational cost, which makes fully deterministic optimisation impractical for dynamic self-organising networks where decisions must be produced under strict latency constraints [22]. Within the CSD-flow distribution problem, this motivates a hybrid strategy that combines a global evolutionary search with local refinement steps, so that the global structure of assignments is preserved while local corrections reflect the current resource state and inter-flow dependencies [23, 24]. It is widely observed in practical optimisation tasks that evolutionary methods hybridised with local improvement can deliver higher-quality solutions and reach near-optimal results faster than purely classical exact procedures under comparable time limits [11–13].

To formalise the proposed method of multi-criteria optimisation of CSD flow distribution, an algorithm has been developed, the generalised structure of which is presented in the form of a block diagram (Fig. 1).

The main effect of the proposed approach was evaluated using temporal QoS indicators, as they directly characterise the quality of data stream service and reflect the result of coordinated global and local optimisation.

The generalised values of delays before and after applying the algorithm are shown in Table 1.

Fig. 2 shows a comparative characteristic of QoS metrics for data flows before and after optimisation.

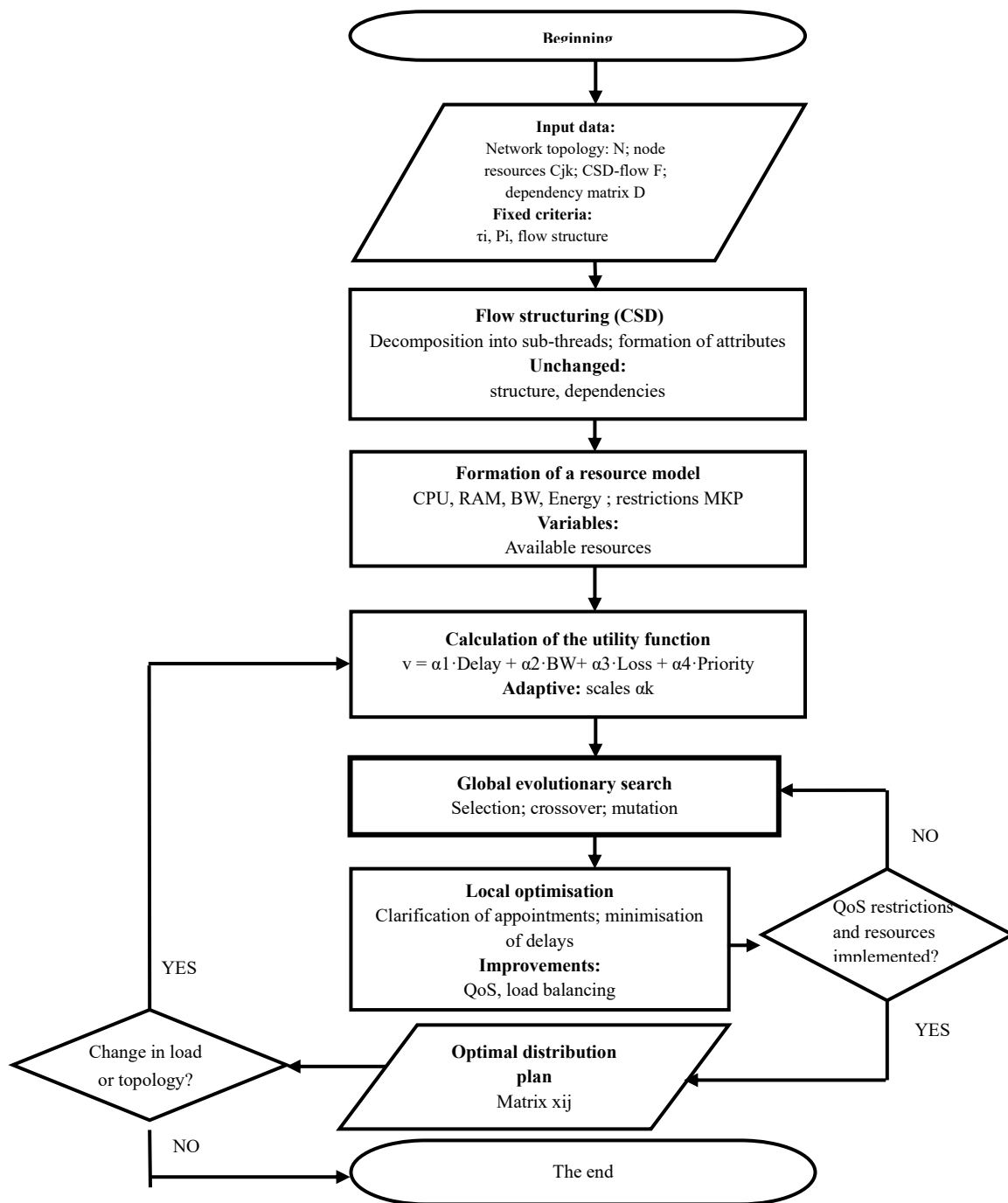


Fig. 1. Block diagram of the algorithm for multi-criteria distribution of CSD flows in a self-organised network

Table 1 – Data flow service quality delay indicators

№	Indicator	To optimisation, ms	After optimisation, ms
1	Final transmission delay (intercluster)	42.0	37.0
2	Average end-to-end delay	118.0	104.0
3	QoS delay of critical flows	76.0	68.0
4	QoS delay for low-priority flows	131.0	156.0

As can be seen from Table 1 and Fig. 2, after applying the algorithm, inter-cluster and end-to-end delays are reduced, as well as the delay of critical flows.

At the same time, an increase in delay is observed for low-priority flows, which corresponds to the mechanism of prioritisation and redistribution of resources in favour of critical traffic. Accompanying indicators characterising the structural, control and computational consequences of optimisation are given in Table 2.

Since the accompanying indicators in Table 2 have different physical units and scales, their comparison in a single figure is presented in a normalised form. For each indicator, the baseline state "before optimisation" is taken as 100, while the value "after optimisation" is presented as a relative index. This method of presentation ensures a correct comparison of the structural, control and computational effects of the algorithm in a single graphical representation.

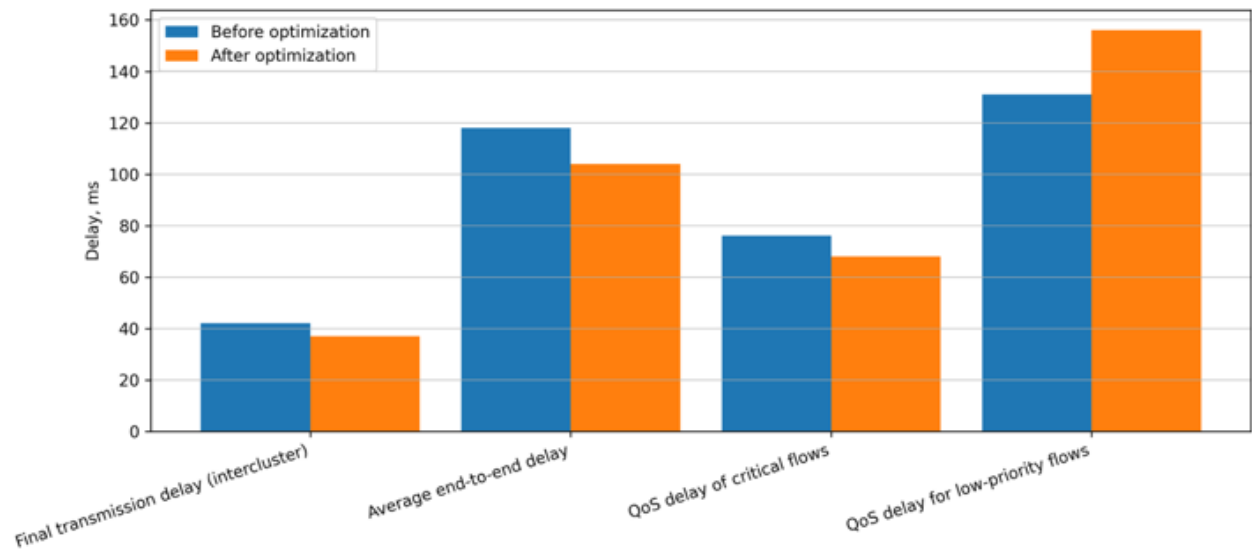


Fig. 2. Comparison of QoS delay metrics for data flows before and after optimization

Table 2 – Accompanying indicators

№	Indicator	To optimisation	After optimisation	Interpretation
1	Load dispersion of nodes	0.41	0.26	improved balancing
2	Number of congested channels	7	4	reduction of local overloads
3	Cluster fragmentation	0.28	0.18	improvement of structural integrity
4	Number of route rebuilds per interval	9	14	increase in adaptive restructuring
5	Convergence time after topology change	8.2	5.1	faster recovery
6	Computational time of the optimisation cycle	41	63	increase in computing costs
7	Traffic management during recovery	520	430	reduction in overhead costs

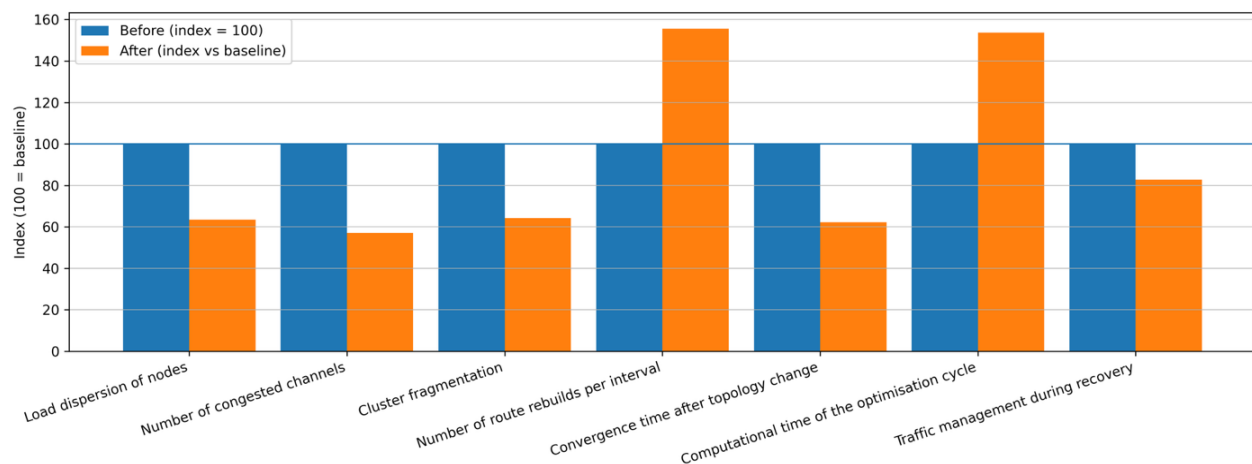


Fig. 3. Comparison of accompanying indicators in Table 2 before and after optimisation on a normalised scale

As can be seen from Table 2 and Fig. 3, after applying the method, the indicators characterising imbalance and structural degradation decrease: node load dispersion, the number of overloaded channels, and cluster fragmentation. At the same time, the convergence time after a topology change is reduced, indicating an increase in the speed of restoring the controlled state of the network. The reduction in control traffic during recovery indicates a decrease in overhead costs for coordination and reconfiguration procedures.

The gain in adaptability is accompanied by higher operational overhead. Specifically, the network performs route updates more often per interval, and the optimisation loop requires longer computation time [19]. We interpret

this as a deliberate trade-off: maintaining near-optimal decisions under volatile resources and topology requires periodic re-optimisation [3]. According to Fig. 1, the main source of overhead is the hybrid workflow that combines a global scheduling phase with local refinements [11]. While this improves distribution quality and tolerance to changes, it naturally increases the reconfiguration rate and the computational cost [20].

As can be seen from Table 1, the application of the proposed algorithm leads to a reduction in QoS delay indicators, in particular, the final intercluster delay, the average end-to-end delay, and the delay of critical flows. The effect is achieved through a combination of global coordination of flow distribution, local route refinement,

and adaptive reconfiguration procedures when the network state changes.

The accompanying indicators shown in Table 2 reflect the trade-offs of optimization [21]. In particular, there is an increase in the number of route rebuilds and computational costs, as well as an increase in delays for low-priority flows. These changes are consistent with the multi-criteria optimisation approach, which prioritises critical traffic and limited network resources [19]. For the multidimensional knapsack problem in the context of CSD-flow, an approximate solution search algorithm combining global search and local improvement is applied, which allows obtaining practically acceptable solutions in a limited time under dynamic conditions [7, 15].

The method consists of several stages, such as structuring the flow, in which the flow is broken down into sub-flows according to criteria: functional purpose, QoS requirements, and dependencies between components. Building a node model where a knapsack problem is created for each node, which contains resource constraints, local delay characteristics, and possible routes to other nodes. A greedy algorithm is applied: subflows are sorted by priority and delay, and each subflow is assigned to the node with the best resource and delay ratio. An evolutionary algorithm performs a global search for optimal flow assignment schemes [11]. After each iteration, a local search is performed to refine the assignment by analysing the movements of sub-threads between nodes [12, 13]. Evolutionary operators, crossover and mutation, allow us to escape local minima and explore new areas of the solution space.

The proposed method is made more efficient by detailed modelling of the internal structure of flows, which allows optimising assignments with precision down to individual sub-flows, as well as by taking into account the multidimensional resource constraints of nodes. Experimental analysis shows that the use of a combined approach reduces the number of iterations to a stable solution and increases the stability of the solutions obtained under variable load conditions. However, the effectiveness of the method begins to decline with a sharp increase in the number of sub-threads and resource types, as the search space and computation time increase. Additional performance losses are possible in scenarios with overly frequent topology changes or high overhead costs for migrating subthreads between nodes. This determines the limits of the method's applicability in real-time systems with strict constraints on decision-making delays. In modern video surveillance systems, the distribution of sub-streams between Edge nodes allows for a significant reduction in throughput load and an increase in the speed of analytical data processing [1].

In industrial IoT systems, the volume of sensor streams can reach tens of thousands. According to recent studies, traditional routing methods do not provide effective distribution at such a scale, while the multidimensional knapsack problem allows for a significant improvement in the accuracy of stream assignment [8]. In Fog networks, optimisation of streaming services reduces energy consumption and delays in data processing, as confirmed by the results of a number of experimental studies.

In the evolutionary approaches to multi-criteria flow distribution, optimisation is performed at the level of aggregated traffic units, which simplifies the model but limits its applicability in the case of complexly structured flows. [15]. Unlike evolutionary methods, in which a flow is considered as an aggregated unit of optimisation, the proposed approach operates with a multi-level CSD-flow structure. The proposed model considers a complexly structured flow as a set of subflows, each of which acts as a separate unit of destination and optimisation and is characterised by its own attributes, QoS requirements and dependencies. This decomposition provides a more accurate assessment of the load on nodes and allows you to form a distribution plan that takes into account traffic heterogeneity and service priorities. This makes it possible to take into account the dependencies between subflows and assign them to nodes, taking into account individual resource requirements and delays, which increases the accuracy of distribution in self-organising networks. It is effective for a large number of criteria, but does not take into account the internal structure of the flow [6]. In the method of multi-criteria distribution of data flows in telecommunications networks based on an evolutionary approach, the flow is modelled as an aggregated unit, which simplifies the model but limits its application to CSD-flow. The proposed method takes into account the internal multi-level structure, which allows optimising resources with sub-flow accuracy.

Unlike existing evolutionary methods, the proposed approach has the following features: takes into account the multidimensionality of resource constraints, which increases the accuracy of the model; uses a multi-criteria optimisation algorithm, which provides better convergence in complex tasks; operates in a self-organised manner, i.e. without centralised management.

Hybrid algorithms combine different optimisation principles. In the proposed method, hybridisation occurs between an evolutionary algorithm that generates many solution variants; a local search that improves the quality of each solution; and a knapsack problem that formally limits the solution space. The optimisation procedure combines global formation of a set of candidate solutions based on evolutionary search and local refinement focused on improving the quality of assignments in the immediate vicinity. This combination increases convergence stability and reduces the risk of getting stuck on locally optimal solutions in problems with a large number of sub-threads and high load variability.

Modern multi-objective evolutionary algorithms, such as NSGA-III, effectively form sets of compromise solutions, but their application in flow distribution problems has significant limitations.

In particular, such algorithms: do not take into account the CSD-flow structure; do not work with multidimensional resources; poorly adapt to dynamic changes in traffic; do not take into account dependencies between subflows. A comparison with known evolutionary approaches shows that in the case of CSD-flow, explicit consideration of the sub-flow structure and multidimensional resource constraints is critically important. The transition from an aggregated representation of traffic to a representation in the form of

subflows ensures the controlled assignment of flow components to nodes, taking into account QoS requirements, while the multidimensional formulation of constraints increases the adequacy of the assessment of available resources in networks with dynamic topology.

Conclusions

The article develops a comprehensive method for multi-criteria optimisation of the distribution of complex data flows in self-organised telecommunications networks. The method is based on representing each flow as a set of sub-flows with heterogeneous QoS requirements and taking into account the multidimensional resource constraints of nodes. The resource constraints of nodes are formalised as a multidimensional knapsack problem, and optimisation is implemented by combining global evolutionary search and local refinement of solutions with adaptive route restructuring when the network state. The results of simulation modelling confirmed that the application of the developed method allows reducing the delay characteristics of critical flows, increasing the uniformity of load distribution, and reducing the convergence time after topology changes. At the same time, a controlled

compromise was established: there is an increase in the frequency of route reconfiguration and computational costs of the optimisation cycle with a deterioration in performance for low-priority flows. In future research, it is planned to mitigate the effect of service degradation for low-priority flows as a side effect of multi-criteria optimisation. The proposed approach can be used as a basic mechanism for adaptive flow control in Fog, Edge, and Cloud environments, as well as in other decentralised infrastructures with variable resources and topology.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding this study, including financial, personal, authorship, or other, that could influence the study and its results presented in this article.

Using artificial intelligence tools

For the initial literature search and for shaping the review structure, the generative AI tools ChatGPT (version 5.2) and Grok 4 were used to help systematise approximately 100 sources. The final literature analysis and the writing of the manuscript were performed independently by the author.

REFERENCES

- Guerrero, C., Lera, I., Juiz, C. Evaluation and efficiency comparison of evolutionary algorithms for service placement optimization in fog architectures. *Future Generation Computer Systems*, 2019, Vol. 97, P.P. 131–144, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.056>.
- Apat, H.K., Nayak, R., Sahoo, B., Sahu, S.K. Fog Service Placement Optimization: A Survey of State-of-the-Art Strategies and Techniques. *Computers*, 2025, Vol. 14, No. 3, Art. 99, DOI: <https://doi.org/10.3390/computers14030099>.
- I Lera, I., Guerrero, C. Multi-objective application placement in fog computing using graph neural network-based reinforcement learning. *The Journal of Supercomputing*, 2024, Vol. 80, No. 19, P.P. 27073–27094, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-024-06439-5>.
- Liu, Q., Mo, R., Xu, X., Ma, X. Multi-objective resource allocation in mobile edge computing using PAES for Internet of Things. *Wireless Networks*, 2024, Vol. 30, No. 5, P.P. 3533–3545, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11276-020-02409-w>.
- Talavera, F., Lera, I., Juiz, C., Guerrero, C. Genetic-Based Fog Colony Optimization Hybridized with Hierarchical Clustering and Its Influence in the Placement of Fog Services, 2022, arXiv:2209.05794, DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.05794>.
- Deb, K., Jain, H. An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Non-Dominated Sorting Approach (NSGA-III) // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, Vol. 18, No. 4, P.P. 577–601, DOI: <https://doi.org/10.1109/TEVC.2013.2281535>.
- Palanikumar, K., Buvaneshwari, A. Hybrid Metaheuristics for Multi-Dimensional Knapsack Problems: A Survey and Analysis // *Applied Soft Computing*, 2023, Vol. 146, Art. 110377, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110377>.
- Sarrafzade, N., Entezari-Maleki, R., Sousa, L. A genetic-based approach for service placement in fog computing // *The Journal of Supercomputing*, 2022, Vol. 78, No. 8, P.P. 10854–10875, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-021-04254-w>.
- Lera, I., Guerrero, C., Juiz, C. Availability-aware Service Placement Policy in Fog Computing Based on Graph Partitions // *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, Vol. 6, No. 2, P.P. 3641–3651, DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2889511>.
- Mohammadi Erbaty, M., Tajiki, M.M., Schiele, G. Service Function Chaining to Support Ultra-Low Latency Communication in NFV // *Electronics*, 2023, Vol. 12, No. 18, Art. 3843, DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12183843>.
- Whitley, D. A genetic algorithm tutorial // *Statistics and Computing*, 1994, Vol. 4, No. 2, P.P. 65–85, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00175354>.
- Khafa, F., Abraham, A. Computational models and heuristic methods for Grid scheduling problems // *Future Generation Computer Systems*, 2010, Vol. 26, No. 4, P.P. 608–621, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2009.11.005>.
- Bujok, P., Tvrdik, J., Polakova, R. Nature-Inspired Algorithms in Real-World Optimization Problems // *MENDEL*, 2017, Vol. 23, No. 1, P.P. 7–14, DOI: <https://doi.org/10.13164/mendel.2017.1.007>.
- Suhl, U. A fully polynomial approximation algorithm for the 0–1 knapsack problem // *European Journal of Operational Research*, 1981, Vol. 8, No. 3, P.P. 270–273, DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(81\)90175-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(81)90175-2).
- Syvolovskyi, I., Komar, O. A Method of Multicriteria Data Stream Distribution in Telecommunication Networks Based on an Evolutionary Approach // *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, 2025, No. 59, P.P. 41–50, DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-41>.
- Syvolovskyi, I., Lysechko, V. Method of hierarchical clustering of nodes in distributed telecommunications systems using graph algorithms // *Control, Navigation and Communication Systems*, 2025, P.P. 255–262, DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.2.255-262>.
- Syvolovskyi, I., Lysechko, V. Method for leader node selection and processing pipeline formation in distributed telecommunication systems // *Science-Based Technologies*, 2025, Vol. 66, No. 2, P.P. 190–200, DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.66.20311>.

18. Guerrero, C., Lera, I., Juiz, C. Distributed genetic algorithm for application placement in the compute continuum leveraging infrastructure nodes for optimization. *Future Generation Computer Systems*, 2024, Vol. 160, P.P. 154–170, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2024.05.044>.
19. Abdi, S., Ashjaei, M., Mubeen, S. Cost-aware workflow offloading in edge-cloud computing using a genetic algorithm// *The Journal of Supercomputing*, 2024, Vol. 80, P.P. 24835–24870, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-024-06341-0>.
20. Magoula, L., Barmounakis, S., Stavrakakis, I., Alonistioti, N. A genetic algorithm approach for service function chain placement in 5G and beyond, virtualized edge networks// *Computer Networks*, 2021, Vol. 195, Art. 108157, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108157>.
21. Afrin, M., Jin, J., Rahman, A., Tian, Y.-C., Kulkarni, A. Multi-objective resource allocation for Edge Cloud based robotic workflow in smart factory. *Future Generation Computer Systems*, 2019, Vol. 97, P.P. 119–130, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.062>.
22. Van Mieghem, P., Kuipers, F.A. On the complexity of QoS routing// *Computer Communications*, 2003, Vol. 26, No. 4, P.P. 376–387, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-3664\(02\)00156-1](https://doi.org/10.1016/S0140-3664(02)00156-1).
24. Ford, A., Raiciu, C., Handley, M., Bonaventure, O. TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses (Multipath TCP) (RFC 8684)// RFC Editor, 2020, RFC 8684, DOI: <https://doi.org/10.17487/RFC8684>.
25. Nafjan, K.A., Kerridge, J.M. Large join order optimization on parallel shared-nothing database machines using genetic algorithms// *Euro-Par'97 Parallel Processing (Euro-Par 1997)*. Lecture Notes in Computer Science, 1997, Vol. 1300, P.P. 1159–1163, DOI: <https://doi.org/10.1007/BFb0002867>.

Received (Надійшла) 25.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Лозко Олена Володимирівна – молодший науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Olena Lozko – Junior Research Fellow, Research Department, Scientific Center of the Air Force, Ivan Kozhedub National of Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: vladimirovnae952@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-6442-019X>.

Лисечко Володимир Петрович – доктор технічних наук, професор, начальник науково-дослідного відділу наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Volodymyr Lysechko – Dr Sc., Professor, Head of the Research Department for the Study and Implementation of Experience of the Air Force Scientific Center of the Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: lysechkov@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-1520-9515>.

Сиволовський Ілля Михайлович – доктор філософії, асистент кафедри систем управління літальними апаратами Національного аерокосмічного університету “Харківський авіаційний інститут”, Харків, Україна.
Iliya Syvolovskyi – PhD, Assistant at the Department of Aircraft Control Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine.
e-mail: ilyasvl95@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-4592-0965>.

Пастушенко Володимир Васильович – здобувач ступеня доктора філософії, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.
Vasyl Pastushenko – Post-Graduate Student, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.
e-mail: VPastushenko@kart.edu.ua, ORCID Author ID <https://orcid.org/0009-0000-7462-5052>.

Метод багатокритерійної оптимізації розподілу потоку даних у самоорганізованих телекомунікаційних мережах

О. В. Лозко, В. П. Лисечко, І. М. Сиволовський, В. В. Пастушенко

Анотація. Актуальність. Самоорганізовані мережі працюють в умовах змінної топології та доступності ресурсів. Необхідно спільно зменшити затримку та дисбаланс навантаження, одночасно підвищуючи стійкість до збоїв та змін топології. Це вимагає адаптивної оптимізації з прийняттям рішень майже в реальному часі. **Об'єкт дослідження:** процеси розподілу складноструктурованих потоків даних у самоорганізованих телекомунікаційних мережах за обмежень ресурсів вузлів. **Мета статті:** розробити багатокритеріальний метод оптимізації розподілу потоків, який спільно зменшує дисбаланс затримки та навантаження та підвищує стійкість до збоїв та змін топології, враховуючи неоднорідні вимоги до якості обслуговування (QoS) та обмежені ресурси вузлів. **Результати дослідження.** Кожен потік представлений як набір підпотоків з неоднорідними вимогами до QoS. Обмеження обчислювальних та пропускних ресурсів вузлів формалізовано як багатовимірну задачу ранця. Цикл оптимізації поєднує глобальний еволюційний пошук з локальним уточненням рішень. Адаптивна реструктуризація маршруту застосовується у відповідь на зміну трафіку та зміни стану мережі. Результати моделювання підтверджують зменшення міжкластерних та наскрізних затримок, зменшення затримок критичного потоку, покращення рівномірності розподілу навантаження та скорочення часу конвергенції після змін топології. Водночас, метод збільшує частоту реконфігурацій маршрутів та обчислювальні витрати циклу оптимізації, а також погіршує продуктивність потоків з низьким пріоритетом, що інтерпретується як контрольований компроміс, властивий багатокритеріальній оптимізації. **Висновки.** Запропонований метод покращує ефективність розподілу потоків у динамічних самоорганізованих мережах, забезпечуючи найбільші переваги для критичних потоків та конвергенції після змін топології. Покращення досягається за рахунок вищих обчислювальних витрат та частіших реконфігурацій маршрутів, зі зниженням продуктивності для потоків з низьким пріоритетом. Метод підходить для середовищ Fog, Edge та Cloud, де потрібні адаптивні рішення в режимі реального часу за умов змін топології та мінливості ресурсів.

Ключові слова: самоорганізовані телекомунікаційні мережі; багатокритеріальна оптимізація; балансування навантаження; розподіл потоку даних; багатовимірні задача рюкзака; еволюційні алгоритми; оптимізація ресурсів.

М. М. Суровицький, Т. В. Філімончук, С. О. Партика, О. М. Севостьянова

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

Анотація. Актуальність дослідження зумовлено стрімким розвитком інформаційних технологій та цифровізацією освітнього процесу, що робить належну організацію комп'ютерної мережі у закладі вищої освіти критично важливою. Сучасні мережі закладів вищої освіти стикаються з викликами функціонального розділення сегментів, потребою захищати критично важливі дані від гостювого доступу, а також вимогами до масштабованості, гнучкості та відмовостійкості інфраструктури. У зв'язку з цим, набуває актуальності розробка математичної моделі, яка формалізує структурні та функціональні особливості мультисегментної мережі закладу вищої освіти з фокусом на відмовостійкості та політиці безпеки. **Об'єктом дослідження** виступає комп'ютерна мережа закладу вищої освіти, що охоплює її структуру, технічні засоби та процеси функціонування. **Предметом дослідження** виступають методи, моделі та технології оптимізації роботи цієї мережі на основі сучасних технологій передачі даних. **Результатом роботи** є удосконалена математична модель функціонування комп'ютерної мережі закладу вищої освіти, що поєднує сім ключових вимог: побудову ієрархічної архітектури, забезпечення високої пропускну здатності й швидкодії, підтримку відмовостійкості та резервування, гарантування безпеки й контролю доступу, раціональне управління ресурсами, можливість масштабування й адаптивності, а також врахування потреб користувачів. Проведені експериментальні випробування засвідчили результативність запропонованих механізмів. **Висновки.** Запропонована модель ефективно формалізує багатоаспектну інфраструктуру комп'ютерної мережі закладу вищої освіти та здатна кількісно оцінювати надійність через ймовірність відмови критичних компонентів, що дозволяє створювати масштабовані, гнучкі та безпечні мережні рішення, які мінімізують ризики для критичних даних та забезпечують безперервність освітнього процесу.

Ключові слова: комп'ютерна мережа закладу вищої освіти, математична модель, мультисегментна система, відмовостійкість, резервування, VLAN, політика безпеки, міжмережний екран.

Вступ

Постановка проблеми. В умовах стрімкого розвитку інформаційних технологій та цифровізації навчання [1] належна організація комп'ютерної мережі у закладі вищої освіти (ЗВО) є критично важливою для забезпечення ефективного та продуктивного освітнього процесу. Мережа ЗВО використовується як для надання здобувачам освіти необхідних навчальних ресурсів та інструментів, так і для проведення викладачами лекцій та практичних занять. Однак, сучасні мережі ЗВО стикаються з низкою викликів, зокрема необхідністю забезпечити:

- функціональне розділення мережі на сегменти для різних цілей (навчання, адміністрація, зберігання даних, відеоспостереження);

- безпеку та ізоляцію критично важливих сегментів (управління даними ЄДЕБО/ДЕКАНАТ та адміністративний сегмент) від гостювого доступу;

- масштабованість, гнучкість, відмовостійкість інфраструктури через механізми резервування даних, каналів та дублювання маршрутизаторів.

Традиційні підходи до побудови комп'ютерних мереж (КМ) часто потребують складного ручного налаштування та не завжди забезпечують необхідну гнучкість для швидкого реагування на зміну потреб [2]. У зв'язку з цим набуває актуальності впровадження нового підходу до формування мереж ЗВО, починаючи з етапу планування складових математичної моделі, який передбачає використання інтелектуальних технологій автоматизованого проектування, віртуалізації та програмно-конфігурованих мереж (SDN). Такий підхід дозволяє моделювати мережну інфраструктуру як єдину адаптивну систему, у

якій топологія, політики безпеки, маршрутизація та розподіл ресурсів визначаються програмно, а не лише фізичною архітектурою. Завдяки цьому забезпечується: динамічна масштабованість мережі при зростанні кількості користувачів або сервісів, автоматизоване керування та спрощене адміністрування мережних пристроїв, підвищення надійності та безпеки завдяки централізованому контролю доступу та моніторингу, оптимізація продуктивності за рахунок інтелектуального розподілу трафіку та ресурсів, інтеграція з хмарними та віртуальними середовищами для розгортання навчальних та адміністративних сервісів.

Таким чином, нове покоління мереж ЗВО розглядається не лише як набір з'єднаних між пристроями, а як керована, масштабована та самоналаштовувана система, яка побудована на основі математичних моделей, що враховують реальні параметри, навантаження та вимоги користувачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз досліджень та публікацій зосереджений на структурній та функціональній оптимізації комп'ютерних мереж закладів вищої освіти (КМ ЗВО). Найчастіше мережа ЗВО розглядається як складна мультисегментна система, що вимагає впровадження спеціальних механізмів для забезпечення надійності та безпеки.

Дослідження [3] зосереджується на аналізі структурних особливостей мереж закладів вищої освіти (ЗВО), приділяючи особливу увагу принципам їх побудови та функціональному поділу. Представлена робота є особливо релевантною для формування цілісного уявлення про те, яким чином варто організувати захист мережі установи. Стаття

присвячена критично важливій темі – розробці та впровадженню комплексної технології (методики, моделі) для забезпечення інформаційної та кібербезпеки у специфічному секторі ЗВО України. Запропоновані технічні рішення забезпечують логічну ізоляцію трафіку, підвищує рівень безпеки, створюють можливості для масштабування інфраструктури та полегшують управління мережею в умовах зростання потреб користувачів та сервісів.

Дослідження [4] логічно доповнює структурний аналіз мереж, оскільки зосереджується на оптимізації ієрархічної організації комунікаційної інфраструктури. У роботі виділено три ключові рівні ієрархії (магістральний, зональний та внутрішній), кожен із яких виконує свою функціональну роль у забезпеченні ефективної передачі даних та управління навантаженнями. Особливу увагу приділено побудові математичної моделі, яка дає змогу визначати оптимальну конфігурацію структури мережі з урахуванням пропускної здатності, затримок, надійності та вартості обладнання. Завдяки такому підходу дослідження демонструє, що архітектура мережі ЗВО повинна розглядатися як багаторівнева система, де кожен рівень не лише виконує власні функції, а й взаємодіє з іншими для забезпечення цілісності та масштабованості інфраструктури, що підкреслює важливість комплексного моделювання при проектуванні сучасних мереж ЗВО та дозволяє досягти збалансованості між продуктивністю, надійністю та економічною доцільністю.

Посібник [5] присвячений огляду технологій захисту інформації та розробленню політики безпеки, що безпосередньо пов'язані з критично важливими вимогами до сегментації й захисту мережної інфраструктури. Автори детально розглядають механізми логічного поділу мережі на ізольовані віртуальні сегменти, що дає змогу мінімізувати вплив небажаного трафіку та локалізувати потенційні загрози. Зокрема, підкреслюється, що ізоляція трафіку між сегментами досягається завдяки коректному налаштуванню VLAN (Virtual Local Area Network), що унеможливує пряме взаємне бачення пристроїв різних підмереж та підвищує рівень керованості. Посібник акцентує увагу на розмежуванні доступу та впровадженні політик безпеки шляхом використання міжмережних екранів, які контролюють міжсегментні з'єднання, що дозволяє гнучко регулювати правила взаємодії між різними частинами мережі, запроваджувати фільтрацію трафіку, здійснювати моніторинг та виявлення аномалій. Таким чином, комплексне застосування VLAN та міжмережних екранів розглядається як ключовий інструмент забезпечення захищеної, керованої та масштабованої мережної архітектури, що є особливо актуальним для інфраструктури ЗВО з великою кількістю користувачів та різномірних сервісів.

У роботі [6] розглянуто комплексні підходи до забезпечення відмовостійкості та катастрофостійкості в корпоративних мережах, акцент зроблено на поєднанні технічних та архітектурних рішень, які мінімізують ризики простоїв та втрати даних. Автори детально аналізують сучасні механізми резерву-

вання, серед яких особливе місце займають технології MultiWAN, системи дублювання мережевого ядра та методи підвищення надійності зберігання інформації. Зокрема, підкреслюється, що відмовостійкість мережного ядра та його каналів досягається шляхом використання дубльованих маршрутизаторів, які працюють у режимах автоматичного перемикання або балансування навантаження. Технологія MultiWAN забезпечує паралельне підключення до кількох провайдерів, що дозволяє підтримувати доступність зовнішнього каналу навіть у разі відмови одного з них, а також оптимізувати маршрутизацію трафіку. Для зберігання даних в дослідженні пропонується використання RAID-масивів, які забезпечують захист від виходу з ладу фізичних носіїв, та на використанні механізмів реплікації в реальному часі, що дозволяють створювати синхронні копії критично важливої інформації на резервних серверах або у віддалених дата-центрах. Такий підхід формує багаторівневу модель надійності, у якій збереженість даних та безперервність роботи сервісів підтримується навіть у випадках серйозних технічних збоїв.

Поглиблюючи аспект мережної стійкості, у статті [7] проаналізовано підходи до оптимізації алгоритмів функціонування комп'ютерних мереж підвищеної живучості ще на етапі їх проектування. Автори акцентують увагу на необхідності врахування потенційних зовнішніх впливів, збоїв та структурних змін мережної інфраструктури, що можуть виникати в процесі її експлуатації. Саме тому ключовою метою роботи є розробка критерію живучості, який дозволяє кількісно оцінити здатність мережі адаптуватися до непередбачуваних умов, зберігати працездатність та забезпечувати мінімальний необхідний рівень сервісів. У статті підкреслено, що критерій живучості охоплює як параметри стійкості топології, так і ефективність алгоритмів перебудови маршрутизації та перерозподілу навантажень. Він дозволяє моделювати поведінку мережі в умовах часткових відмов, аналізувати часові характеристики відновлення та визначати оптимальні стратегії резервування. Такий підхід є особливо значущим для побудови корпоративних мереж ЗВО, де високий рівень доступності сервісів, стійкість до зовнішніх впливів та можливість оперативної реконфігурації інфраструктури мають критичне значення.

Для теоретичного обґрунтування концепції живучості мереж особливо важливими є фундаментальні напрацювання у цій галузі. Зокрема, у дослідженні [8] сформульовано базові підходи до розуміння живучості інформаційних систем як здатності продовжувати функціонування в умовах зовнішніх впливів, часткових відмов чи деградації окремих компонентів. Автори пропонують універсальні принципи аналізу стійкості, що охоплюють як структурні, так і функціональні властивості систем, а також визначають загальні критерії, за якими можна оцінювати рівень їхньої здатності до відновлення та адаптації. Наведені положення формують методологічну основу, яку можна застосувати до телекомунікаційних та корпоративних мереж, зокрема до інфраструктури ЗВО.

Доповненням до цього підходу є робота [9], у якій об'єктом дослідження виступають ієрархічні телекомунікаційні мережі. Автори зосереджуються на методах кількісної оцінки живучості таких мереж, пропонуючи формальні метрики, що враховують багаторівневу організацію, динаміку відмов елементів різної критичності та поведінку мережі при перебудові топології. Завдяки цьому підхід дозволяє визначити, наскільки ефективно мережа зберігає працездатність за умов часткових пошкоджень, а також оцінити оптимальність впроваджених механізмів резервування.

Автор роботи [10] детально розглядає принципи організації систем зберігання даних та резервного копіювання в ІТ-інфраструктурах, що працюють із персональними даними, яка потребує підвищеного рівня захисту, надійності та контролю доступу. У дослідженні аналізуються сучасні підходи до побудови сховищ, включно з використанням мережних накопичувачів, систем централізованого зберігання, а також багаторівневої архітектури резервного копіювання. Значну увагу приділено питанням відповідності правовим та нормативним вимогам щодо обробки персональних даних, зокрема забезпеченню цілісності, конфіденційності та доступності інформації. У роботі підкреслюється, що резервне копіювання є критичною складовою будь-якої системи управління даними, оскільки саме воно гарантує можливість відновлення інформації у разі технічних збоїв, помилок користувачів або зовнішніх кіберзагроз. Автор розглядає різні стратегії резервування (повне, інкрементне, диференційоване) та моделі зберігання копій як локально, так і на віддалених майданчиках. Окремий акцент зроблено на автоматизації процесів резервування та використанні політик зберігання, які дозволяють підтримувати баланс між безпекою, продуктивністю та ефективністю використання ресурсів. Робота [11] присвячена комплексному математичному моделюванню мережного трафіку та оцінці продуктивності в мультисервісних мережах, що характеризуються різноманітністю переданих даних, різними вимогами до затримок, пропускної здатності та надійності. Автори пропонують системний підхід до опису процесів маршрутизації, обробки та передачі трафіку, базований на апараті теорії масового обслуговування, стохастичних процесів і мережних моделей. У роботі детально формалізовано структурні елементи мережі, включно з вузлами комутації, каналами зв'язку, сервісними чергами й потоками трафіку різних класів. Окрему увагу приділено врахуванню пропускної здатності каналів зв'язку, затримок різних типів (маршрутизаційних, комутаційних, транспортних) та механізмів управління чергами, що дає можливість проводити аналіз якості обслуговування (QoS), оцінювати й оптимізувати продуктивність мережі під час роботи з великими обсягами даних та множиною сервісів. Важливим аспектом дослідження є також методи оцінювання надійності мультисервісних мереж, у тому числі через моделювання механізмів резервування каналів та вузлів. Автори розглядають варіанти забезпечення стійкості мережної інфраструктури до

відмов, дозволяючи кількісно оцінити вплив резервування на загальну доступність системи.

У руслі моделювання трафіку та аналізу продуктивності мереж дослідження [12] приділяє значну увагу системам управління трафіком, що забезпечують стабільність та ефективність роботи мережної інфраструктури в умовах змінних навантажень. У роботі детально розглянуто методи QoS, які дозволяють гарантувати пріоритетність окремих типів трафіку та забезпечити відповідний рівень якості обслуговування для критичних сервісів. Крім того, досліджується застосування механізмів traffic shaping, які спрямовано на згладжування пікових навантажень та запобігання перевантаженню каналів зв'язку, а також load balancing – балансування навантаження між маршрутизаторами, серверами або каналами з метою підвищення продуктивності й стійкості системи в цілому. Представлені методи є ключовими для підтримки оптимальної пропускної здатності, мінімізації затримок та стабільного функціонування мережі ЗВО, яка обслуговує велику кількість користувачів та різноманітних сервісів. У доповнення до цього у роботі [13] розглядається застосування графових моделей як універсального інструменту для аналізу структурних та функціональних характеристик комп'ютерних мереж. У таких моделях вузли графа відображають маршрутизатори, комутатори чи інші мережні елементи, тоді як ребра описують канали зв'язку. Вага ребра, що визначає пропускну спроможність каналу або затримку, дозволяє точно формалізувати параметри інфраструктури та виконувати розрахунки, необхідні для оптимізації мережі. Особливе значення має можливість обчислення максимального потоку між вузлами за допомогою класичних алгоритмів, таких як метод Форда-Фалкерсона, що створює основу для кількісної оцінки пропускної здатності окремих сегментів мережі, виявлення «вузьких місць» та визначення потенційних напрямів модернізації інфраструктури. Використання графових моделей також дозволяє аналізувати живучість мережі через оцінку альтернативних шляхів, виявлення критичних зв'язків та моделювання сценаріїв відмов.

Проведений аналіз підтверджує актуальність напрямку розробки математичної моделі, що формалізує структурні та функціональні особливості мультисегментної мережі ЗВО з фокусом на відмовостійкості та політиці безпеки. В рамках процесу моделювання «наповненості» КМ ЗВО слід орієнтуватися на методи, які спрямовані на забезпечення структурної та функціональної оптимізації. В даному напрямку дослідження мережу ЗВО слід розглядати як складну мультисегментну систему, ядро якої формується з основного маршрутизатора, до якого підключені сегменти через комутатори та маршрутизатори. В якості складових такої мережі можливо розглядати:

- комп'ютерні класи для здійснення навчальної діяльності;
- систему управління даними (ЄДЕБО та ДЕКАНАТ) для зберігання персональних даних здобувачів освіти та викладачів;

- систему відеоспостереження;
- адміністративний сегмент, орієнтований на управління фінансовими та кадровими аспектами;
- гостьовий доступ для користувачів, який відокремлений від внутрішньої мережі;
- підсистему зберігання та резервування даних.

Критично важливими вимогами, які висуваються до цих складових є:

- ізоляція трафіку між сегментами, що забезпечується використанням VLAN [14];
- резервування даних (використання RAID-масивів, реплікація в реальному часі);
- відмовостійкість ядра та каналів (дублювання маршрутизаторів та MultiWAN);
- захищеність від атак.

Взаємодія між складовими мережі відбувається через її ядро за допомогою кореневих комутаторів та маршрутизаторів [15], а міжсегментні з'єднання проходять через міжмережні екрани для розмежування доступу та забезпечення політики безпеки [16].

Метою цієї роботи є удосконалення математичної моделі функціонування КМ ЗВО, яка формалізує її ключові структурні елементи (сегменти, вузли, зв'язки), механізми відмовостійкості (резервування), а також політику безпеки та конфігурацію трафіку (VLAN, пропускна здатність).

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати сучасні складові моделей функціонування КМ ЗВО та виявити їх переваги та обмеження;

- удосконалити математичну модель шляхом розширення її складових, що дозволить інтегрувати політику безпеки та кількісно оцінювати показники надійності через ймовірність відмови;

- виконати експериментальні дослідження та за їх результатами провести порівняльний аналіз базової та модифікованої моделі КМ ЗВО з позиції гнучкості, ефективності та масштабованості.

Основна частина

За попереднім аналізом сучасного стану інфраструктури (апаратно-програмного забезпечення, мережної архітектури, інформаційно комунікаційної системи ЗВО) можливо зробити висновок, що КМ ЗВО є багаторівневою ієрархічною системою, що може включати ядро мережі, розподільчий рівень та рівень доступу до кінцевих пристроїв. Математично таку мережу можливо представити як неорієнтований або орієнтований граф (1), де кожне ребро графа може бути охарактеризовано набором параметрів (затримка передачі, пропускна здатність каналу, коефіцієнт надійності):

$$M = \{N, C\}, \quad (1)$$

де N (Nodes) – вузли КМ, C (Channels) – канали зв'язку між вузлами.

Щоб мережа ЗВО була продуктивною, надійною та безпечною, вона має відповідати певним технічним, організаційним та структурним вимогам: мати ієрархічну архітектуру, високу пропускну здатність та швидкодію, бути відмовостійкою, оперувати політиками безпеки, бути гнучкою та масштабованою, а

також надавати можливість ефективного управління ресурсами мережі, орієнтуючись на потреби користувачів. КМ, що побудована на основі кортежу (1), на жаль не оперує поняттями, що перелічено вище, тому було вирішено розширити цю модель за рахунок додавання необхідних складових:

$$M = \{N, C, HA, BC, FR, SA, RM, SG, UB\}, \quad (2)$$

де N (Nodes) – вузли КМ, C (Channels) – канали зв'язку між вузлами, HA (Hierarchical Architecture) – ієрархічна архітектура, BC (Bandwidth & Capacity) – пропускна здатність та швидкодія, FR (Fault Tolerance & Redundancy) – відмовостійкість та резервування, SA (Security & Access Control) – безпека та контроль доступу, RM (Resource Management) – ефективне управління ресурсами, SG (Scalability & Flexibility) – масштабованість та гнучкість, UB (User-Based Requirements) – потреби користувачів.

КМ ЗВО буде продуктивною лише, тоді коли вона буде мати ієрархічну архітектуру, тобто буде поділена на декілька рівнів:

- рівень ядра, який забезпечує високу швидкість передавання даних між основними сегментами, мінімальну затримку та високу пропускну здатність;

- розподільчий рівень, який відповідає за маршрутизацію між VLAN, політики доступу, балансування навантаження;

- рівень доступу, який відповідає за підключення користувачів, лабораторій, серверів, відеосистем тощо.

Для реалізації такого підходу пропонується розширити складову, що відповідає за архітектуру:

$$HA = \{CL, DL, AL\}, \quad (3)$$

де CL (Core Layer) – рівень ядра (висока швидкість передавання даних, мінімальна затримка), DL (Distribution Layer) – розподільчий рівень (маршрутизація між VLAN, політики доступу, балансування навантаження), AL (Access Layer) – рівень доступу (підключення користувачів, лабораторій, серверів).

Розгортання КМ ЗВО з орієнтацією на ієрархічну архітектуру (3) спрощує у майбутньому адміністрування, підвищує масштабованість та надійність системи в цілому.

Складова, що відповідає за пропускну здатність та швидкодію (BC) – це ключовий показник ефективності комп'ютерної мережі ЗВО (4). Вона визначає, наскільки швидко дані можуть передаватися між користувачами, серверами, навчальними ресурсами та зовнішніми мережами. Щоб мережа задовольняла цим потребам, слід дотримуватися правил:

- ядро мережі повинно працювати з пропускну здатністю 1 Гбіт/с та більше, що забезпечує швидке обслуговування трафіку між корпусами, серверними кімнатами, дата-центрами та адміністративними сегментами;

- розподільчий рівень – бажано не менше 100 Мбіт/с, з можливістю агрегування каналів (Link Aggregation, LACP);

- рівень доступу – 100 Мбіт/с на робочу станцію, а для комп'ютерних класів або лабораторій з високим навантаженням повинна бути закладена підтримка 1 Гбіт/с Ethernet;

- для міжкорпусних з'єднань слід застосовувати оптоволоконні лінії, які забезпечують мінімальні втрати та затримку сигналу.

$$BC = \{TO, LD, LB, MDT, SO, PM\}, \quad (4)$$

де TO (Traffic Optimization) – оптимізація трафіку, LD (Low Delay) – зменшення затримок, LB (Load Balancing) – балансування навантаження, MDT (Modern Data Transmission Technologies) – сучасні технології передачі даних, SO (Server Optimization) – оптимізація серверної інфраструктури, PM (Performance Monitoring) – моніторинг продуктивності.

Кортеж (4) формально описує основні елементи, що впливають на пропускну здатність та швидкодію комп'ютерної мережі ЗВО. Оптимізація трафіку в мережі (TO) передбачає ефективне керування потоками даних з метою забезпечення стабільної роботи сервісів та раціонального використання ресурсів:

$$TO = \{QoS, DR, PC, SLB\}, \quad (5)$$

де QoS (Quality of Service) – вибір пріоритетного трафіку, DR (Dynamic Routing) – динамічна маршрутизація, PC (Proxy Caching) – кешування Proxy, SLB (Server Load Balancing) – балансування серверного навантаження.

Одним із ключових інструментів для цього є використання технології QoS, яка пріоритезує трафік відповідно до його важливості. Зокрема, найвищий пріоритет надається навчальним сервісам, таким як Moodle, Zoom, Meet та Microsoft Teams, оскільки вони забезпечують безпосередню підтримку освітнього процесу. Трафік службового або адміністративного призначення отримує середній пріоритет, що гарантує стабільну роботу внутрішніх інформаційних систем. Гостьовий доступ, який не є критичним для основної діяльності, має найнижчий рівень пріоритету, аби не перевантажувати основні канали зв'язку.

Для підвищення ефективності передачі даних слід застосовувати динамічну маршрутизацію (DR) за допомогою протоколів OSPF, EIGRP або BGP, що дозволяє автоматично обирати найоптимальніші шляхи руху трафіку залежно від стану мережі.

Важливим елементом оптимізації трафіку в мережі є використання технологій кешування через Proxy-сервери (PC), які зберігають копії даних, що часто використовуються. Такий підхід зменшує обсяг зовнішнього трафіку, прискорює доступ до ресурсів та знижує навантаження на зовнішні канали зв'язку

У комплексі всі заходи, що зазначено у кортежі (5) створюють умови для стабільної, швидкої та надійної роботи мережної інфраструктури, особливо в середовищі з великою кількістю користувачів та критично важливими онлайн-сервісами. Додавання складової, що слідує за зменшенням затримок у мережі (LD) є важливим аспектом підвищення її продуктивності та якості роботи користувачів:

$$LD = \{L3S, MH, DNSC, CDN\}, \quad (6)$$

де L3S (Layer 3 Switching) – високошвидкісні комутатори L3, MH (Minimum Hops) – мінімізація «стрибків» між вузлами, DNSC (DNS Caching) – локальний DNS-кеш, CDN (Content Delivery Network) – мережа доставки контенту.

Основною метою цього процесу є скорочення часу, який витрачається на передачу даних між пристроями та сервісами. Для досягнення мінімальної затримки використовуються високошвидкісні комутатори третього рівня (L3S), які здатні обробляти трафік безпосередньо на апаратному рівні. Такий підхід забезпечує прискорення процесів маршрутизації, оскільки обробка пакетів здійснюється апаратно, а не програмно, що значно скорочує час їхнього проходження через мережу. Ще одним важливим чинником є мінімізація кількості «стрибків» між вузлами (MH), тобто зменшення кількості проміжних пристроїв, через які проходять дані на шляху від відправника до одержувача. Оптимальною вважається глибина маршруту у 2-3 переходи, що дозволяє уникати зайвих затримок, пов'язаних із перенаправленням трафіку між численними проміжними точками.

Великий вплив на швидкість доступу до ресурсів має оптимізація DNS-сервісів. Впровадження локального DNS-кешування (DNSC) дозволяє значно скоротити час пошуку потрібних адрес, що забезпечує швидший доступ до вебресурсів, які часто використовуються та зменшує навантаження на канали зв'язку.

Крім того, ефективним засобом зниження затримок є використання мереж доставки контенту (CDN). Завдяки цій технології освітні платформи, навчальні матеріали та інші ресурси зберігаються на серверах, розташованих географічно ближче до користувачів, що дозволяє значно прискорити завантаження контенту, покращити стабільність з'єднання та забезпечити комфортну роботу з навчальними онлайн-сервісами навіть при великій кількості одночасних підключень.

У сукупності всі заходи, що зазначено у кортежі (6) сприяють зниженню затримок у передачі даних, підвищенню швидкодії мережі та поліпшенню загальної якості досвіду користувача.

Балансування навантаження є важливою складовою забезпечення стабільної та ефективної роботи мережної інфраструктури (LB), особливо в умовах великої кількості користувачів та високих навантажень на сервери чи канали зв'язку. Основна мета цього процесу полягає в рівномірному розподілі запитів та трафіку між наявними ресурсами, що дозволяє уникнути перевантаження окремих вузлів і забезпечує безперервність роботи сервісів:

$$LB = \{SLB, NLB, MWS\}, \quad (7)$$

де SLB (Server Load Balancing) – серверне балансування навантаження, NLB (Network Load Balancing) – мережне балансування навантаження, MWS (MultiWAN support) – одночасне підключення до декількох провайдерів.

Одним із ключових напрямів є серверне балансування навантаження (SLB), яке передбачає розподіл запитів користувачів (наприклад, запитів здобувачів освіти до навчальних порталів чи БД) між кількома веб- або прикладними серверами. Завдяки цьому кожен сервер отримує лише частину загального навантаження, що запобігає його перевантаженню та підвищує стабільність функціонування всієї системи. Такий механізм дозволяє ефективно використовувати обчислювальні ресурси, забезпечує швидку обробку

запитів та підвищує загальну доступність освітніх сервісів, навіть у разі зростання кількості користувачів або тимчасового виходу з ладу одного з серверів.

Іншим напрямом є мережне балансування навантаження (NLB), яке полягає в оптимізації розподілу вихідного трафіку між кількома інтернет-каналами. У системах з підтримкою MultiWAN (MW) така технологія дозволяє одночасно використовувати декілька підключень до різних провайдерів, що підвищує пропускну здатність та надійність мережі. У разі збою або перевантаження одного з каналів трафік автоматично перенаправляється через інший, забезпечуючи безперервність роботи користувачів та сервісів.

Завдяки поєднанню серверного та мережного балансування (7) досягається високий рівень відмовостійкості, стабільності та продуктивності мережної інфраструктури, що є особливо важливим для навчальних середовищ, де безперервний доступ до онлайн-ресурсів має критичне значення.

Впровадження в мережу ЗВО сучасних технологій передачі даних (MDT) суттєво підвищує швидкість, надійність та ефективність мережної інфраструктури:

$$\text{MDT} = \{\text{EC, SDN, IPV6, WIFI}\}, \quad (8)$$

де EC (EtherChannel) – об'єднання кількох фізичних ліній в один канал, SDN (Software Defined Networking) – централізоване керування мережею, IPV6 (Internet Protocol v6) – маршрутизація та адресація, WIFI (Wi-Fi Standards) – стандарти бездротових ліній зв'язку.

Одним із таких рішень є EtherChannel з використанням протоколу LACP, що дозволяє об'єднувати кілька фізичних ліній у один логічний канал. Цей підхід забезпечує збільшення пропускну здатності між комутаторами чи серверами, підвищує відмовостійкість мережі та дозволяє розподіляти навантаження між декількома фізичними кабелями, мінімізуючи ризик перевантаження окремого каналу.

Ще одним важливим інструментом є SDN, який забезпечує централізоване керування всією мережею. Завдяки цій технології адміністратори можуть динамічно оптимізувати маршрути трафіку, контролювати пріоритети даних і швидко адаптувати мережу до змінних умов, що особливо важливо для великих освітніх або корпоративних середовищ із високою активністю користувачів.

У комплексі всі технології, що наведено у кортежі (8) створюють високо продуктивну, надійну та масштабовану мережну інфраструктуру, здатну підтримувати сучасні освітні процеси та інтенсивне використання цифрових ресурсів.

Впровадження в мережу механізмів, що орієнтовані на оптимізацію серверної інфраструктури (SO), має на меті підвищення продуктивності, надійності та гнучкості обчислювальних ресурсів:

$$\text{SO} = \{\text{VIRT, NVMe, RAID}\}, \quad (9)$$

де VIRT (Virtualization) – віртуалізація, NVMe (High-speed NVMe storage) – швидкісні накопичувачі, RAID – масиви зберігання даних.

Один із ключових підходів, що спрямовані на оптимізацію серверної інфраструктури, полягає у використанні віртуалізованих серверів на платформах таких як VMware, Proxmox або Hyper-V. Віртуалізація

дозволяє динамічно розподіляти ресурси між різними віртуальними машинами залежно від навантаження, що забезпечує ефективніше використання апаратного забезпечення та дозволяє швидко масштабувати обчислювальні потужності під потреби користувачів.

Для забезпечення одночасної високої швидкодії та надійності зберігання даних використовуються RAID-масиви, зокрема конфігурації RAID 10 або RAID 6. RAID 10 поєднує переваги дзеркалювання та смугування даних, що забезпечує швидкий доступ до інформації та одночасно високу відмовостійкість, тоді як RAID 6 дозволяє витримати вихід з ладу кількох накопичувачів без втрати даних. Такі рішення гарантують безперервність роботи сервісів та захист критично важливої інформації навіть у разі апаратних збоїв. У сукупності заходи, які представлено кортежем (9) забезпечують високу продуктивність, надійність та гнучкість серверної інфраструктури, що є критично важливим для сучасних освітніх та корпоративних систем. Застосування у комп'ютерній мережі механізмів, що допомагають здійснювати моніторинг продуктивності та серверної інфраструктури (PM) є критично важливим для забезпечення стабільної та ефективної роботи систем в цілому:

$$\text{PM} = \{\text{NM, MPD, AN}\}, \quad (10)$$

де NM (Network Monitoring) – моніторинг мережі, MPD (Monitoring of Performance Data) – набір систем моніторингу, AN (Alert Notifications) – механізм оповіщення про проблеми у роботі.

Наявність механізму моніторингу (NM) у мережі передбачає безперервний контроль швидкості передачі даних, навантаження на сервери та мережні вузли за допомогою спеціалізованих систем, таких як PRTG Network Monitor, Zabbix, Nagios або SolarWinds NPM. Цей набір інструментів дозволяє в реальному часі виявляти вузькі місця, де продуктивність мережі або серверів обмежується надмірним навантаженням чи технічними обмеженнями.

У комплексі моніторинг продуктивності (10) забезпечує прозорість роботи систем, своєчасне виявлення потенційних проблем та дозволяє планувати оптимізацію мережі та серверної інфраструктури на основі реальних даних.

Впровадження складової, що слідкує за відмовостійкістю системи та резервуванням інформації, якою вона оперує (FR), є ключовим аспектом забезпечення стабільної та безперебійної роботи мережної та серверної інфраструктури:

$$\text{FR} = \{\text{BRD, TP, VRRP, MW, BCP}\}, \quad (11)$$

де BRD (Backup Routers & Devices) – резервне обладнання, TP (Tree Protocol) – набір технологій для уникнення петель, VRRP (Virtual Router Redundancy Protocol) – протокол для забезпечення дублювання шлюзів, MW (MultiWAN Channels) – розподіл трафіку між каналами та автоматичне переключення на резервний канал, BCP (Backup & Cloud Replication) – резервне копіювання.

Основною метою заходів, що зазначено у кортежі (11), є гарантування безперервного доступу до сервісів навіть у разі виходу з ладу окремих компонентів або каналів зв'язку. Для цього в мережах передбачають наявність резервних маршрутизаторів, комутаторів та

каналів зв'язку (BRD), які можуть автоматично підміняти основні вузли та лінії при їхньому збою, забезпечуючи безперервність передачі даних.

Для запобігання проблемам у топології мережі застосовуються технології STP та RSTP, які дозволяють уникати утворення петель та забезпечують стабільну маршрутизацію трафіку. Дублювання шлюзів реалізується за допомогою протоколів VRRP або HSRP, що дозволяє резервним шлюзам автоматично брати на себе функції основного у разі його відмови. У випадку підключення до кількох провайдерів використовується MultiWAN, що забезпечує розподіл трафіку між каналами та автоматичне переключення на резервний канал при збоях основного. Важливим елементом відмовостійкості є регулярне резервне копіювання даних (BCP), що досягається через використання RAID-масивів, які забезпечують збереження інформації навіть при виході з ладу окремих накопичувачів, а також через реплікацію даних у хмарі, що дозволяє мати актуальні резервні копії поза межами локальної інфраструктури. У результаті поєднання резервних пристроїв, дублікації каналів та шлюзів, а також систем резервного копіювання створюється комплексна система відмовостійкості, яка забезпечує надійну, безперебійну та стійку роботу мережі та серверів навіть у разі технічних збоїв чи перевантажень.

Механізми, які реалізують безпеку та рівень доступу у мережі (SA), є невід'ємними складовими сучасної мережної інфраструктури, що спрямовані на захист даних та забезпечення правильного розподілу прав користувачів:

$$SA = \{VLAN, FW, IPS, AC, ENC\}, \quad (12)$$

де VLAN (Segmentation of traffic) – VLAN сегментація, FW (Firewalls) – міжмережні екрани, IPS (Intrusion Prevention System) – система запобігання несанкціонованим вторгненням, AC (Access Control) – система аутентифікації користувачів, ENC (Encryption) – захист переданих даних від перехоплення та несанкціонованого доступу.

Одним із основних заходів у цій сфері є сегментація мережі за допомогою VLAN, що дозволяє відокремлювати студентські, адміністративні та гостьові зони. Така організація забезпечує контрольоване обмеження доступу між різними групами користувачів та мінімізує ризик поширення загроз у мережі. Для захисту від кібератак використовуються міжмережні екрани (FW) та системи виявлення та запобігання вторгненням (IPS), які відстежують трафік, виявляють підозрілі дії та надають можливість блокувати потенційні загрози до того, як вони можуть вплинути на роботу мережі або сервісів. Контроль доступу до ресурсів реалізується через системи аутентифікації користувачів (AC), такі як RADIUS, LDAP або Active Directory, що дозволяють перевіряти права доступу та забезпечують централізоване управління обліковими записами. Такий підхід гарантує, що тільки авторизовані користувачі отримують доступ до відповідних ресурсів, а права та ролі можна налаштувати відповідно до потреб організації.

Для захисту переданих даних від перехоплення та несанкціонованого доступу (ENC) застосовується

шифрування трафіку. Використання VPN забезпечує безпечно віддалене підключення, HTTPS гарантує захищену передачу даних через вебсервіси, а сучасні стандарти Wi-Fi, такі як WPA3, підвищують безпеку бездротових підключень. У комплексі заходи, що впроваджено у складову SA (12), забезпечують захист мережі, контроль за доступом до ресурсів та безпечну передачу даних, що особливо важливо в освітніх і корпоративних середовищах із великою кількістю користувачів та різномірними зонами доступу.

Ефективне управління ресурсами в сучасних мережних та серверних інфраструктурах за рахунок використання відповідного набору механізмів (RM) є ключовим фактором забезпечення стабільності, продуктивності та швидкого реагування на зміни навантаження чи потенційні проблеми (13):

$$RM = \{NMS, OEM, ACNF\}, \quad (13)$$

де NMS (Network Management Systems) – централізоване адміністрування, OEM (Operational Efficiency Monitoring) – моніторинг ефективності функціонування, ACNF (Automated Configuration) – автоматизація конфігурацій та оновлень.

Одним із основних підходів до досягнення цього є централізоване адміністрування за допомогою систем управління мережею (NMS). Централізоване адміністрування дозволяє контролювати всі вузли та пристрої мережі з одного інтерфейсу, відстежувати їхній стан, налаштовувати політики доступу, керувати конфігураціями та планувати масштабування ресурсів відповідно до потреб організації. Не менш важливим аспектом є моніторинг ефективності функціонування (OEM), який дає змогу відстежувати стан мережі та серверів у реальному часі. Застосування систем, таких як Nagios, Zabbix або PRTG, дозволяє контролювати завантаження каналів зв'язку, використання серверів пам'яті, затримки передачі даних та інші критичні параметри. Завдяки цьому адміністратори можуть своєчасно виявляти вузькі місця, потенційні проблеми та загрози, що дозволяє швидко реагувати та запобігати простою або зниженню продуктивності. Ще одним важливим елементом ефективного управління є автоматизація конфігурацій та оновлень (ACNF) за допомогою спеціалізованих інструментів, таких як Ansible або Cisco DNA Center. У результаті поєднання централізованого адміністрування, постійного моніторингу продуктивності та автоматизації конфігурацій (13) досягається високий рівень ефективного управління ресурсами, що дозволяє підтримувати стабільну, безпечну та масштабовану мережну інфраструктуру навіть у складних і динамічних умовах експлуатації.

Масштабованість та гнучкість (SG) – це ключові характеристики освітньої мережної інфраструктури, які визначають здатність системи швидко адаптуватися до змінних потреб та зростання навантаження:

$$SG = \{NE, VRT, SDN, CT\}, \quad (14)$$

де NE (Network Expansion) – можливість розширення мережі, VRT (Virtualization) – підтримка віртуалізації, SDN (Software Defined Networking) – програмно-конфігуровані мережі, CT (Cloud Technologies) – хмарні технології.

Одним із проявів масштабованості є можливість легко розширювати мережу (NE) шляхом підключення нових корпусів, факультетів або лабораторій без необхідності повної перебудови існуючої інфраструктури. Такий підхід дозволяє організаціям ефективно реагувати на збільшення числа користувачів, нові освітні програми або технологічні проекти, зберігаючи при цьому стабільність та продуктивність мережі.

Підтримка віртуалізації серверів та мережних елементів (VRT) є важливим інструментом досягнення гнучкості. У поєднанні з технологіями SDN, що дозволяють централізовано керувати потоками даних та змінювати маршрути передачі інформації у реальному часі, така інфраструктура стає максимально адаптивною та готовою до швидких змін.

Важливу роль у забезпеченні масштабованості таких систем відіграють хмарні технології (CT), які дозволяють зберігати великі обсяги даних, навчальні ресурси та резервні копії поза межами локальної інфраструктури. У сукупності масштабованість та гнучкість (14) дозволяють мережній та серверній інфраструктурі адаптуватися до умов освітнього процесу, які постійно змінюються, забезпечувати ефективне використання ресурсів та гарантувати безперервний доступ до сервісів навіть при різкому збільшенні кількості користувачів або розширенні функціональних потреб установи.

Орієнтація на потреби користувачів (UB) є ключовим принципом побудови сучасної освітньої мережної інфраструктури, оскільки саме комфорт та ефективність роботи кінцевих користувачів визначають успішність цифрових сервісів:

$$UB = \{SQ, WFC, GA\}, \quad (15)$$

де SQ (Service Quality) – висока якість обслуговування, WFC (Wi-Fi Coverage) – надійне покриття Wi-Fi, GA (Guest Access) – можливість гостьового доступу (ізолювані гостьові VLAN).

Одним із аспектів цього підходу є забезпечення високої якості обслуговування (SQ) для критичних застосунків, таких як ЄДЕБО, Moodle, Zoom, Meet та Microsoft Teams. Пріоритизація трафіку цих сервісів гарантує, що навчальні платформи, відеоконференції та електронні документообіги працюють стабільно та без затримок, що дозволяє здобувачам освіти та викладачам ефективно взаємодіяти та отримувати доступ до освітніх ресурсів у будь-який час без перебоїв або падіння продуктивності.

Ще одним важливим елементом орієнтації на користувача є надійне покриття Wi-Fi у всіх зонах перебування здобувачів освіти та співробітників. Мережа повинна забезпечувати стабільне та швидке з'єднання не лише у навчальних корпусах і лабораторіях, але й у інших громадських просторах на території установи. Такий підхід дає змогу користувачам залишатися підключеними до освітніх ресурсів та сервісів у будь-який момент, не знижуючи продуктивності освітнього процесу. Не менш важливою є можливість гостьового доступу (GA) до мережі, що дозволяє відвідувачам, гостям та стороннім користувачам підключатися без негативного впливу на безпеку та продуктивність внутрішньої мережі. Для

цього застосовуються ізолювані гостьові VLAN та відповідні механізми контролю доступу, що гарантують захист критично важливих ресурсів та даних організації. У комплексі заходи, що зазначено у кортежі (15) дозволяють створити інфраструктуру, що орієнтована на кінцевого користувача, яка забезпечує стабільну роботу критичних сервісів, комфортний доступ до навчальних матеріалів та високий рівень безпеки, задовольняючи потреби здобувачів освіти, викладачів та гостей установи.

Результати та їх обговорення

На основі модифікованої моделі (2) та впроваджених функціональних механізмах (3-15), проведено ряд експериментів, що демонструють кількісне поліпшення ключових параметрів мережі ЗВО.

Зокрема експеримент, що визначає вплив (SQ) на затримку та продуктивність верифікує ефективність оптимізації трафіку (TO) та забезпечення потреб користувачів (UB) через механізм обирання пріоритетного трафіку QoS. Отже, в результаті проведення експерименту має бути сгенеровано критичний трафік (імітація відеоконференції (Meet, Zoom) та некритичний трафік (інтенсивне завантаження великих файлів), після чого слід вимірити середню затримку (RTT) критичного трафіку у двох режимах. Розглянемо докладніше ці два режими: перший режим (базова мережа) без застосування QoS, другий режим (оптимізована мережа) з активним QoS, де критичний трафік отримує найвищий пріоритет.

Результат генерації у першому режимі під впливом навантаження від некритичного трафіку: середня затримка критичного трафіку може сягати значень, більше 120 мс, що є неприйнятним для VoIP/Video. Перехід до другого режиму із застосуванням QoS призводить до суттєвого зниження RTT до декількох десятків мілісекунд, що підтверджує, що механізм QoS гарантує стабільне виділення смуги та високу якість обслуговування для пріоритетних навчальних сервісів (Meet, Zoom) та адміністративних систем (ЄДЕБО), відповідно до вимог UB.

Наступний експеримент описує можливості кількісної оцінки відмовостійкості (FR) та спрямований на визначення ефективності механізмів резервування, шляхом визначення часу відновлення сервісу (TTR) при моделюванні збоїв ключових компонентів. Розглянуто два критичні сценарії відмови: перший – це відмова основного шлюзу/маршрутизатора на розподільчому рівні, де активовано протоколи дублювання шлюзів VRR; другий – це відмова основного інтернет-каналу, де використовуються резервування та розподіл трафіку MW (MultiWAN). У результаті при відмові основного шлюзу, перемикання на резервний шлюз за допомогою VRR відбувається менше ніж за 3 сек. При відмові основного зовнішнього каналу, переключення на резервний канал MultiWAN займає менше ніж 10 секунд. Отримані результати доводять, що реалізація механізмів (FR) забезпечує високий рівень відмовостійкості та мінімізує час простою мережі, що є критичним для безперервності роботи.

Мета третього експерименту підтвердити ефективність ізоляції критичних сегментів мережі, забезпечену VLAN сегментацією та міжмережними екранами (FW), як елементів безпеки та контролю доступу (SA). Розглянута спроба несанкціонованого доступу до «Адміністративного сегменту» мережі з гостьового та навчального сегментів. Отже, завдяки коректно налаштованим політикам (FW) та ізоляції, забезпеченій VLAN, всі спроби встановлення зв'язку (наприклад, Ping, Telnet) між ізольованими сегментами були заблоковані. Це підтверджує, що запропонована модель успішно реалізує вимогу безпеки та контролю доступу (SA), гарантуючи ізоляцію трафіку та захист критичних даних від неавторизованого доступу з інших сегментів мережі ЗВО.

Висновки

Проведений аналіз та експерименти показали, що запропонована модель функціонування комп'ютерної мережі ЗВО (2) ефективно формалізує багатоаспектну інфраструктуру, що є критично важливою для сучасного закладу освіти. Зазначена модель враховує необхідність функціонального розділення мережі на сегменти. Основними її перевагами є здатність інтегрувати політику безпеки та кількісно оцінювати надійність через ймовірність відмови, що дозволяє створювати масштабовані, гнучкі та безпечні мережні рішення, які мінімізують ризики для критичних даних та забезпечують безперервність освітнього процесу.

Проведений аналіз та розроблена математична модель функціонування КМ ЗВО успішно формалізують багатоаспектну інфраструктуру, що є критично важливою для сучасного закладу освіти.

Основними перевагами моделі є:

- формалізація структурних та функціональних вимог: запропонована модель (2) включає ключові структурні елементи (N, C) та сім основних функціональних вимог: ієрархічну архітектуру (НА), пропускну здатність та швидкодію (BC), відмово-

стійкість та резервування (FR), безпеку та контроль доступу (SA), управління ресурсами (RM), масштабованість та гнучкість (SG), орієнтацію на потреби користувачів (UB);

- сегментація та безпека: модель враховує необхідність функціонального розділення мережі на сегменти (VLAN) для різних цілей (навчання, адміністрація, зберігання даних, відеоспостереження), що дозволяє створювати безпечні мережні рішення, які мінімізують ризики для критичних даних (ЄДЕБО/ДЕКАНАТ) та забезпечують безперервність освітнього процесу;

- інтеграція відмовостійкості: основною перевагою моделі є її здатність інтегрувати механізми відмовостійкості та резервування (FR), включаючи дублювання маршрутизаторів, шлюзів (VRRP) та MultiWAN, що дозволяє кількісно оцінювати надійність через ймовірність відмови критичних компонентів.

Експериментальні дослідження підтвердили ефективність механізмів, що було закладено у моделі. Подальші дослідження будуть зосереджені на кількісній оцінці впливу програмно-конфігурованих мереж (SDN) та віртуалізації (SG) на динамічну масштабованість мережі, а також розробці або модифікації алгоритмів автоматизованого керування політиками безпеки та маршрутизацією на основі даних, отриманих від систем моніторингу RM.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Філімончук Т. В., Плюта А. О. Структура інформаційної системи, що орієнтована на онлайн-навчання. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2021. Вип. 4(66). С. 69–72. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.4.069>
2. Жураковський Б. Ю., Зенів І. О. Комп'ютерні мережі: навчальний посібник. Частина 1. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 328 с. URL: <https://ela.kpi.ua/items/55130022-a21a-474f-8047-028555236092>
3. Нашинець-Наумова А. Ю., Бурячок В. Л., Коршун Н. В., Жильцов О. Б., Складанний П. М., Кузьменко Л. В. Технологія забезпечення інформаційної і кібербезпеки в закладах вищої освіти України. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2020. Т. 77. № 3. С. 337–354. URL: <https://doi.org/10.33407/itlt.v77i3.3424>
4. Васянін В. О., Трофимчук О. М., Ушакова Л. П. Дослідження задачі оптимізації структури ієрархічної комунікаційної мережі при зміні її параметрів. *Екологічна безпека та природокористування*. 2024. Вип. 49 (1). С. 99–125. URL: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.99-125>
5. Жилін А. В., Шаповал О. М., Успенський О. А. Технології захисту інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах: навч. посіб. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. 213 с. URL: <https://ela.kpi.ua/items/8a692251-3210-4a77-b623-9db1af4fa5b2>
6. Fahmi K., Leith D., Kucera S., Claussen H. Understanding MPTCP in Multi-WAN Routers: Measurements and System Design. 2021 IEEE 46th Conference on Local Computer Networks. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/LCN52139.2021.9524976>
7. Ткачов В. М., Коваленко А. А., Фесенко Т. Г. Оптимізація мережного алгоритму функціонування комп'ютерних мереж підвищеної живучості на мобільній платформі на етапі їх проектування. *Зв'язок, телекомунікації та радіотехніка*. 2021. Том 3 №65. С. 143–147. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.3.143>
8. Коник Р. С. Живучість інформаційної системи та основні напрямки її підвищення. *Зв'язок*. №4, 2017. С. 21–23. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewById/808732>

9. Бондаренко Л. О., Масесов М. О., Єфанова К. О., Садиков О. І. Оцінка живучості ієрархічних телекомунікаційних мереж військового призначення. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2018. Т. 31. №1. С. 61–67. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/search/article?articleId=1976195>
10. Nelson S. Pro Data Backup and Recovery. New York: Apress, 2011. 296 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4302-2663-5>
11. Поповський, В. В. та ін. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем. Харків: Компанія СМІТ, 2006. 500 с. URL: <https://opac.kntu.kr.ua/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=4049>
12. Лушпа Б. С., Куриленко А. О., Янковський О. А. Управління трафіком мереж. Тринадцята міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». Баку-Харків-Жиліна-2023. Т. 2, секція 2. С. 103. URL: <https://doi.org/10.32620/ICT.23.t2>
13. Трасковецька Л., Боровик Л., Боровик О. Застосування графових моделей для дослідження характеристик комп'ютерних мереж. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2023. Вип. 91(2). С. 185–191. URL: <https://doi.org/10.32453/3.v91i2.1417>
14. Jadah H. M. Network Performance Through Virtual Local Area Network (VLAN) Implementation & Enforcement On Network Security For Enterprise. *International Journal of Advanced Networking and Applications (IJANA)*. 2021. Vol. 12 Issue: 06. Pp: 4750-4762. URL: <https://doi.org/10.35444/IJANA.2021.12604>
15. Liu L.. Computer Network Routing Optimization Algorithm Based on Neural Network Model. *Asia-Pacific Conf. on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC)*. 2023. Pp. 490–493. URL: <https://doi.org/10.1109/IPEC57296.2023.00091>
16. Liu N., Fan W., Fan J., Zheng H. Fault-Tolerant Secure Routing Based on Trust Evaluation Model in Data Center Networks. *Security and Communication Networks*. Vol. 2022. Issue 1. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/9339515>

Received (Надійшла) 01.12.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

- Суровицький Микола Миколайович** – магістрант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна;
Mykola Surovytskyi – master's student, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: mykola.surovytskyi@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0009-4675-4354>.
- Філімончук Тетяна Володимирівна** – кандидат технічних наук, доцентка, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Tetiana Filimonchuk – PhD, Associate Professor of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: tetiana.filimonchuk@nure.ua; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-4380-504X>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190949991>.
- Партика Станіслав Олександрович** – старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Stanislav Partyka – Senior lecturer of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: stanislav.partyka@nure.ua; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-7376-8980>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57204560890>.
- Севостьянова Олена Миколаївна** – старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Olena Sevostianova – Senior lecturer of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: olena.sevostianova@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-2595-5133>.

Optimization model of a higher education institution's computer network based on data transmission technologies

Mykola Surovytskyi, Tetiana Filimonchuk, Stanislav Partyka, Olena Sevostianova

Abstract. The relevance of the study is determined by the rapid development of information technologies and the digitalization of the educational process, which makes the proper organization of a computer network in a higher education institution critically important. Modern higher education institution networks face challenges related to the functional segmentation of network segments, the need to ensure the security of critical data from guest access, and the requirements for infrastructure scalability, flexibility, and fault tolerance. In this regard, the development of a mathematical model that formalizes the structural and functional features of a multi-segment higher education institution network, focusing on fault tolerance and security policies, becomes relevant. **The object of the study** is the computer network of a higher education institution, encompassing its structure, technical means, and operational processes. **The subject of the study** is the methods, models, and technologies for optimizing the operation of this network based on modern data transmission technologies. **The result of the work** is an improved mathematical model for the functioning of an higher education institution computer network that combines seven key requirements: building a hierarchical architecture, ensuring high throughput and performance, supporting fault tolerance and redundancy, guaranteeing security and access control, rational resource management, enabling scalability and adaptivity, and considering user needs. The conducted experimental tests confirmed the effectiveness of the proposed mechanisms. **Conclusions.** The proposed model effectively formalizes the multi-faceted infrastructure of an higher education institution computer network and is capable of quantitatively assessing reliability through the probability of critical component failure. This allows for the creation of scalable, flexible, and secure network solutions that minimize risks to critical data and ensure the continuity of the educational process.

Keywords: computer network of a higher education institution, mathematical model, multi-segment system, fault tolerance, redundancy, VLAN, security policy, firewall.

Я. В. Чертанов, А. А. Коваленко, В. В. Філіппов

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ПІДХІД ДО ВИБОРУ ПРОТОКОЛУ ТА АРХІТЕКТУРИ АВТОНОМНОЇ ДІЛЯНКИ ГРАНИЧНОГО ШАРУ ІОТ

Анотація. Актуальність. Стрімке зростання масштабів Інтернету речей (ІоТ) та потреб у моніторингу, автоматизації й оптимізації процесів у промисловості, логістиці, енергетиці, транспорті та смарт-технологіях зумовлює підвищений інтерес до ефективної організації мережних протоколів. Вибір протоколів передачі даних і архітектури мережі визначає продуктивність, енергоефективність, масштабованість та надійність ІоТ-систем, що робить цю тематику ключовою для сучасних досліджень і практичного впровадження. **Об'єкт дослідження:** протоколи та архітектури організації мережних протоколів Інтернету речей. **Мета статті:** аналіз і порівняння ефективності протоколів MQTT, CoAP, AMQP, XMPP та DDS, а також централізованої, децентралізованої та гібридної архітектур ІоТ для визначення задовільних рішень щодо побудови продуктивних і надійних систем Інтернету речей. **Результати дослідження.** У роботі проведено аналіз протоколів ІоТ за ключовими метриками: затримкою передачі, енергоефективністю та масштабованістю. Встановлено, що протоколи CoAP і DDS забезпечують найменші затримки, тоді як MQTT і CoAP демонструють найкращу масштабованість. Протокол CoAP виявився найбільш енергоефективним, а AMQP і XMPP – показали підвищені витрати ресурсів. Оцінка архітектур ІоТ показала, що централізована архітектура забезпечує простоту керування, але має низьку стійкість до відмов, децентралізована – високу надійність і масштабованість, гібридна – збалансовані показники затримки, продуктивності й стійкості. Запропоновано комбінований підхід, що поєднує використання CoAP і MQTT у гібридній архітектурі для підвищення ефективності та адаптивності ІоТ-систем. **Висновки.** Сучасні протоколи і архітектури ІоТ мають різну ефективність залежно від умов застосування. Отримані результати можуть бути використані для побудови енергоефективних, масштабованих і надійних ІоТ-рішень у системах розумного моніторингу, автоматизації та безпеки. Сфера використання отриманих результатів: промислові та побутові ІоТ-системи, мережі моніторингу, автоматизовані системи керування, смарт-міста.

Ключові слова: Інтернет речей; протоколи ІоТ; MQTT; CoAP; AMQP; DDS; XMPP; архітектура ІоТ; централізована архітектура; децентралізована архітектура; гібридна архітектура; енергоефективність; масштабованість.

Вступ

Постановка проблеми. Інтернет речей (ІоТ) є одним із ключових напрямків сучасних мережних технологій, що забезпечує з'єднання пристроїв, систем і сенсорів для обміну даними у режимі реального часу. Актуальність цієї технології зумовлена стрімким зростанням потреб у моніторингу, автоматизації та оптимізації процесів у таких сферах, як промисловість, охорона здоров'я, «розумні міста», логістика та побутова техніка [1–3]. Ефективна організація мережних протоколів є основою стабільного та швидкого функціонування систем на базі ІоТ, забезпечуючи злагоджену взаємодію між пристроями. Організації протоколів для ІоТ включають різні рівні архітектурні підходи, орієнтовані на зменшення затримок передачі даних, оптимізацію споживання енергії та забезпечення надійності з'єднань. Архітектури мереж ІоТ зазвичай організовані на основі відповідних потреб. Від вибору архітектури залежить можливість ефективно контролювати систему, витримувати збої вузлів або масштабувати системи на базі ІоТ. Таким чином, розвиток протоколів і архітектур організації мережних протоколів є фундаментальним для стабільного та безпечного функціонування ІоТ, відкриваючи можливості для інновацій у сучасних галузях [4, 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1, 6, 7] описано поєднання протоколу MQTT для забезпечення передачі даних у системах з обмеженими ресурсами та протоколу CoAP для реалізації надійного зв'язку у вузькосмугових мережах.

Дослідження показують, що використання цих протоколів у різних умовах дозволяє досягти значного підвищення продуктивності завдяки оптимізації енергоспоживання та мінімізації затримок.

В іншому дослідженні [4] було проведено порівняльний аналіз архітектур організації мережі ІоТ, таких як централізована, децентралізована та гібридна. Централізована архітектура ефективно працює з невеликою кількістю пристроїв завдяки центральному вузлу контролю даних. У той час децентралізовані архітектури, реалізовані із застосуванням протоколів AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) та DDS (Data Distribution Service), забезпечують підвищену надійність і стійкість мережі завдяки рівномірному розподілу обчислювальних задач. Гібридні системи, що комбінують ці два підходи, демонструють високу ефективність у великих динамічних мережах за рахунок адаптації до навантажень у реальному часі [8]. Застосування таких архітектур у дослідженнях показує їх значні переваги для забезпечення обміну даними в ІоТ-системах із різними вимогами до ресурсів. У складних динамічних умовах вони дозволяють досягти стабільного функціонування завдяки поєднанню високої швидкодії та низьких затрат енергії [6, 8]. Такі результати є важливими для розвитку систем моніторингу, автоматизації та оптимізації процесів у різних сферах застосування Інтернету речей.

Метою роботи є дослідження ефективності, аналіз і порівняння протоколів MQTT, CoAP, AMQP, XMPP та DDS, а також централізованої, децентралізованої і гібридної архітектур організації

мережних протоколів для IoT. Стаття спрямована на оцінку переваг і обмежень кожного протоколу та архітектури і визначенні задовільних рішень для ефективного та продуктивного функціонування систем на базі IoT. Значна увага приділена застосуванню протоколів у різних середовищах, що дозволяє обґрунтувати їх доцільність для конкретних завдань, таких як розподілене збирання даних, автоматизований моніторинг та енергоефективний контроль пристроїв, що дозволить доповнити наявні теоретичні та практичні напрацювання у сфері IoT.

Теоретичний матеріал

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) являє собою легкий протокол обміну повідомленнями, призначений для передачі даних у системах на базі IoT, де обмежені ресурси та нестабільна мережа. Протокол працює за схемою «публікація-підписка» із центральним сервером – брокером, який отримує повідомлення від клієнтів-публікаторів і пересилає їх клієнтам-підписникам на основі заданих тем (рис. 1). Завдяки простій структурі протокол є енергоефективним і мінімізує навантаження на мережу [6,7]. Протокол MQTT підтримує різні рівні надійності, що дозволяють контролювати доставку даних від простого надсилання до гарантованої доставки повідомлень. Ця гнучкість та масштабованість дозволяють використовувати протокол MQTT як у локальних мережах, так і в хмарних сервісах, забезпечуючи ефективну роботу навіть у великих IoT-системах [8]. Проте MQTT має деякі недоліки. Робота протоколу залежить від брокера, що створює потенційну точку вразливості. Для забезпечення безпеки передачі даних необхідно використовувати додаткове шифрування, наприклад, механізми TLS/SSL, оскільки вбудованих механізмів захисту немає [2,9]. Крім того, MQTT обмежений використанням лише стеку протоколів TCP/IP і менш ефективний для передачі великих обсягів даних, оскільки оптимізований для коротких повідомлень. Незважаючи на ці обмеження, завдяки своїй простоті, надійності та енергоефективності MQTT залишається одним із найпопулярніших протоколів для побудови систем на базі IoT та передачі даних між пристроями.

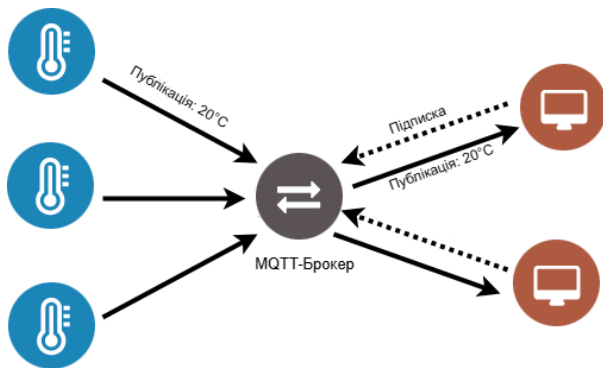


Рис. 1. Схема взаємодії компонентів в IoT при використанні протоколу MQTT

Constrained Application Protocol (CoAP) – це протокол передачі даних, розроблений для пристроїв із

обмеженими обчислювальними ресурсами у системах на базі IoT. Протокол CoAP базується на схемі «клієнт-сервер» (рис. 2) і працює поверх протоколу User Datagram Protocol (UDP), що дає змогу забезпечити високу швидкість передачі даних із мінімальними затримками. Завдяки своїй компактності та простій структурі, CoAP ідеально підходить для малопотужних пристроїв і нестабільних мереж із низькою пропускну здатністю. Протокол CoAP підтримує можливість шифрування і обміну невеликими повідомленнями у форматі, що спрощує передачу даних у енергоефективний спосіб [5]. Додатково протокол використовує REST-подібну архітектуру, де команди взаємодіють із ресурсами серверів, що дозволяє ефективно організувати обмін даними. Перевагами CoAP є його енергоефективність, гнучкість у роботі з невеликими обсягами даних та низькі вимоги до пропускну здатності мережі. Використання протоколу UDP забезпечує швидку передачу, що особливо важливо для пристроїв з короточасними з'єднаннями. Однак внаслідок роботи на основі протоколу UDP, CoAP не забезпечує гарантованої доставки повідомлень і вимагає додаткових механізмів для забезпечення надійності [2, 7]. Іншим недоліком є обмежена масштабованість у порівнянні з іншими протоколами, такими як MQTT. Проте завдяки простоті, швидкості та відповідності специфікам обмежених пристроїв, протокол CoAP є ефективним рішенням для систем на базі IoT, де критично важливими є низьке енергоспоживання і мінімальні затримки при обміні даними.

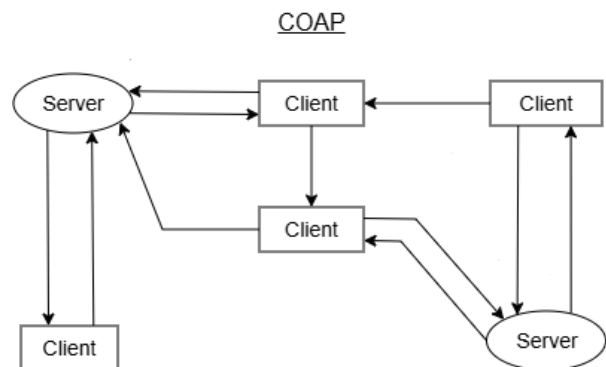


Рис. 2. Схема взаємодії компонентів в IoT при використанні протоколу CoAP

Advanced Message Queuing Protocol (AMQP) є уніфікованим протоколом обміну повідомленнями, призначений для забезпечення надійної та впорядкованої передачі даних між компонентами системи. Протокол AMQP побудований по схемі «публікація-підписка», де центральну роль відіграє брокер повідомлень, який відповідає за прийом, зберігання та доставку даних. Протокол підтримує функціональність черг повідомлень, що дозволяє забезпечувати стійкість до збоїв та ефективне управління потоками даних (рис. 3). AMQP працює поверх протоколу Transmission Control Protocol (TCP), що гарантує надійність та цілісність переданих даних, а його стандартизація дозволяє інтегрувати рішення в системи різного масштабу. Перевагами протоколу AMQP є надійність доставки даних завдяки механі-

зму підтвердження повідомлень та можливість управління чергами для балансування навантаження. Протокол підтримує складну маршрутизацію повідомлень, пріоритезацію та контроль доступу, що робить його ефективним для великих та критичних систем [6,7]. Однак ці можливості супроводжуються значними обчислювальними витратами, що обмежує використання AMQP у пристроях з недостатніми

ресурсами. Крім того, порівняно з простими протоколами, такими як MQTT або CoAP, AMQP вимагає більше пропускну здатності мережі та затрат енергії. Незважаючи на ці обмеження, завдяки своїй гнучкості, надійності та підтримці складних сценаріїв передачі даних, протокол AMQP активно використовується для побудови масштабованих і стабільних систем у сучасних рішеннях IoT [6, 8].

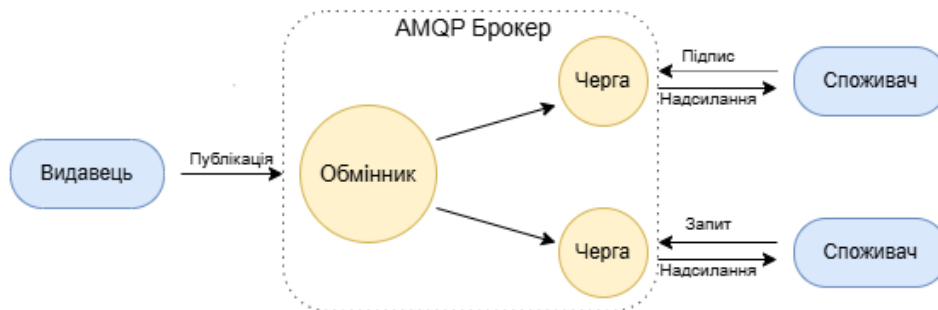


Рис. 3. Схема взаємодії компонентів в IoT при використанні протоколу AMQP

Data Distribution Service (DDS) є протоколом обміну даними, що розроблений для розподілених систем із жорсткими вимогами до швидкості та надійності. Протокол працює за схемою «публікація-підписка» дозволяє учасникам обмінюватися даними асинхронно, без прямого зв'язку між ними. Протокол DDS підтримує налаштування параметрів Quality of Service (QoS), які визначають надійність, затримки та пріоритетність передачі даних, що робить його універсальним для застосувань, таких як промисловий IoT, автономні системи та управління критично важливими інфраструктурами [3,9]. Протокол забезпечує автоматичне виявлення вузлів у мережі, ефективне використання пропускну здатності завдяки фільтрації даних і підтримує як гарантовану, так і оптимальну доставку. Основними перевагами DDS є гнучкість, висока надійність і підтримка роботи в реальному часі, що дозволяє створювати масштабовані системи для складних сценаріїв. Проте його впровадження може бути ускладнене через підвищені вимоги до обчислювальних ресурсів, що обмежує використання у пристроях з недостатніми ресурсами. Завдяки децентралізованій архітектурі та можливостям налаштування QoS, протокол DDS є переважно рішенням для середовищ із високою інтенсивністю взаємодії між пристроями та вимогами до надійності й низьких затримок [3,7].

Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP) є гнучким протоколом обміну повідомленнями та даними, розробленим для передачі структурованої інформації у реальному часі. Спочатку протокол XMPP був створений для систем миттєвого обміну повідомленнями, але завдяки своїй архітектурі він знайшов широке застосування у різних галузях, включно з IoT [7,9]. Протокол базується на архітектурі клієнт-сервер і використовує протокол TCP для надійної та безпечної передачі даних (рис. 4). Однією з ключових особливостей протоколу XMPP є його здатність працювати у децентралізованих системах завдяки підтримці федеративної мережі, де різні сер-

вери взаємодіють між собою для обміну повідомленнями та присутністю. XMPP пропонує численні переваги, серед яких універсальність, розширюваність завдяки XML-структурі та можливість використання у системах, що потребують обміну даними у реальному часі. Завдяки своїй гнучкості протокол підтримує не лише передачу текстових повідомлень, а й мультимедійних даних, керування пристроями та повідомлення про стан присутності, що є важливим для IoT-додатків. Проте використання XML робить протокол XMPP надлишковим порівняно з простими протоколами, такими як MQTT чи CoAP, що обмежує його ефективність у пристроях з обмеженими ресурсами [5, 6]. Крім того, постійна підтримка з'єднання збільшує енергоспоживання, що є критичним для енергоефективних IoT-систем. Незважаючи на ці обмеження, протокол XMPP залишається надійним і універсальним рішенням не тільки для IoT, а й для багатьох інших областей, зокрема систем миттєвого обміну повідомленнями, онлайн-спілкування та корпоративних платформ [3, 8].

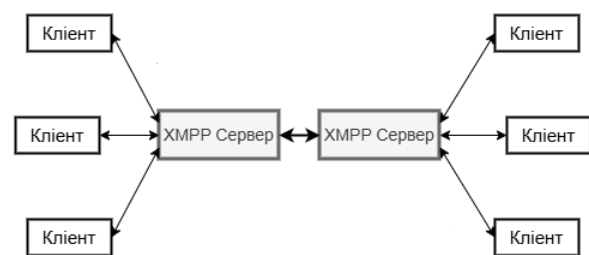


Рис. 4. Схема взаємодії компонентів в IoT при використанні протоколу XMPP

Централізована архітектура є найбільш простою, де всі пристрої підключені до одного центрального вузла (рис. 5, а), що відповідає за обробку даних та координацію системи. Такий підхід забезпечує легке управління та моніторинг усіх процесів, а також високу ефективність передачі даних у реальному часі [4].

Проте централізована архітектура має недолік у вигляді єдиної точки відмови: вихід центрального вузла з ладу призводить до зупинки всієї системи [2, 7]. Децентралізована архітектура розподіляє функції керування та обробки даних між кількома вузлами (рис. 5, б), що взаємодіють автономно. Такий підхід має підвищену стійкість до збоїв, оскільки вихід одного вузла не паралізує всю мережу.

Крім того, децентралізація забезпечує хорошу масштабованість, особливо у великих системах, де навантаження рівномірно розподіляється [4, 8]. Недоліком є складність управління для забезпечення

координатії вузлів і узгодженості даних потрібні додаткові механізми.

Гібридна архітектура поєднує у собі централізовані та децентралізовані принципи, балансує між контролем і гнучкістю. Центральний вузол виконує функцію керування, тоді як частина обчислювальних задач розподіляється між периферійними вузлами (рис. 5, в). Це дозволяє зменшити навантаження на основний сервер та підвищити стійкість системи [4,7]. Гібридна архітектура гнучка та масштабована, але вимагає точного налаштування для оптимальної роботи.

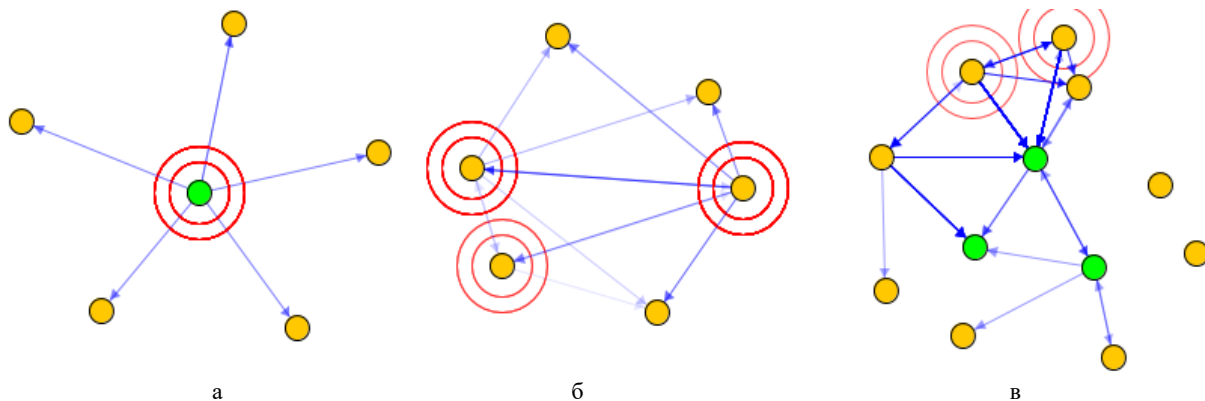


Рис. 5. Види архітектур: а – централізована; б – децентралізована; в – гібридна

Дослідження ефективності мережних протоколів та архітектур IoT

Ефективність протоколів передачі даних залежить від таких критеріїв, як швидкість передачі, енергоефективність, масштабованість та безпека. У сучасних розподілених системах протоколи мають забезпечувати оптимальне використання мережних ресурсів, гарантуючи при цьому стабільну роботу навіть у нестабільних середовищах. Швидкість передачі визначає здатність протоколу ефективно обробляти великий обсяг даних при мінімальних затримках. Енергоефективність є ключовим фактором для пристроїв із обмеженими ресурсами. Масштабованість дозволяє системі ефективно працювати зі збільшенням кількості вузлів чи обсягів даних. Безпека протоколу гарантує захист інформації від несанкціонованого доступу, що є критично важливим для підприємницької діяльності.

Для дослідження ефективності протоколів були використані інструменти Cooja операційної системи Contiki та PerfTest у RabbitMQ. Cooja використовувалася для моделювання протоколів MQTT, CoAP, XMPP та DDS, а PerfTest – для протоколу AMQP. Ці інструменти дозволили отримати інформацію про затримку передачі між пристроями IoT, енергоефективність та масштабованість протоколів. Збір даних для кожного протоколу проводилося у однакових умовах.

Архітектура централізована, наявний один сервер/брокер, змінна кількість клієнтських вузлів. В якості вузлів використовувалися Tmote Sky – платформа для IoT мереж з низьким енергоспоживанням.

У ході дослідження ефективності передачі (рис. 6) найкращі результати продемонстрували протоколи CoAP та DDS, із затримкою в діапазоні від 170 до 270 мс. Для DDS було налаштовано параметри QoS, оптимізовані для швидкої передачі даних через протокол UDP, який також лежить в основі CoAP. Натомість протоколи MQTT, AMQP та XMPP, що працюють на базі TCP, показали схожі результати із затримкою в межах 670–780 мс, що значно перевищує показники CoAP і DDS.

Енергоефективність вузла залежить від часу, витраченого на передачу та отримання даних, навантаження на процесор, а також тривалості перебування в режимі сну. За результатами вимірювань (рис. 7), протокол CoAP продемонстрував найкращі показники енергоспоживання. Протоколи XMPP та MQTT виявили вищу енергопотребу, демонструючи схожі тенденції зростання, тоді як результати протоколів DDS і XMPP були близькими.

Налаштування QoS у протоколах MQTT та DDS суттєво впливає на ефективність передачі даних та енергоспоживання. Зокрема, оптимізація DDS для швидкої передачі інформації спричинила значне зростання енергопотреби вузлів.

Зростання затримки у протоколах на основі UDP є вищим, ніж у аналогічних, але основаних на протоколі TCP, що обмежує їх здатність до масштабування.

Водночас енергоспоживання пристроїв системи на базі IoT визначає тривалість автономної роботи, і зі збільшенням кількості вузлів значне зростання енергопотреби може ускладнити додавання нових пристроїв до мережі.

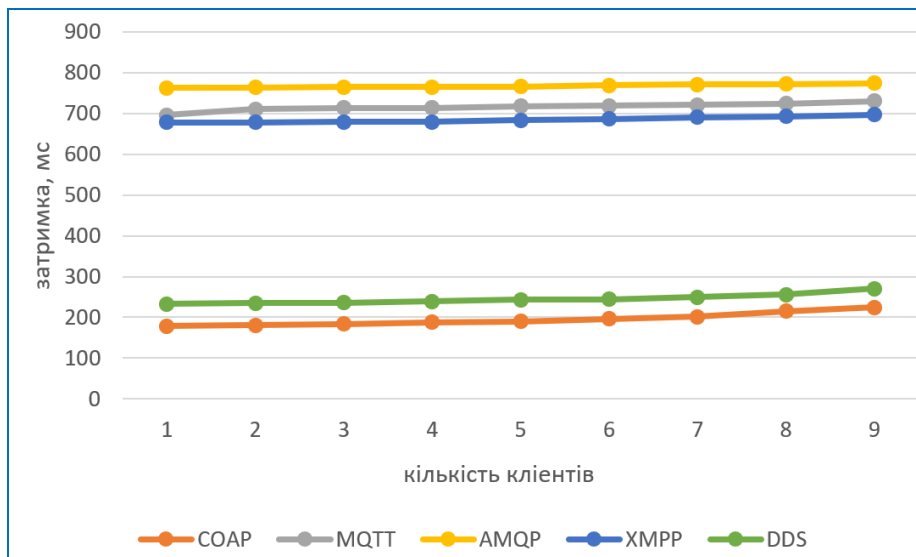


Рис. 6. Графік залежності затримки від кількості клієнтів для різних протоколів

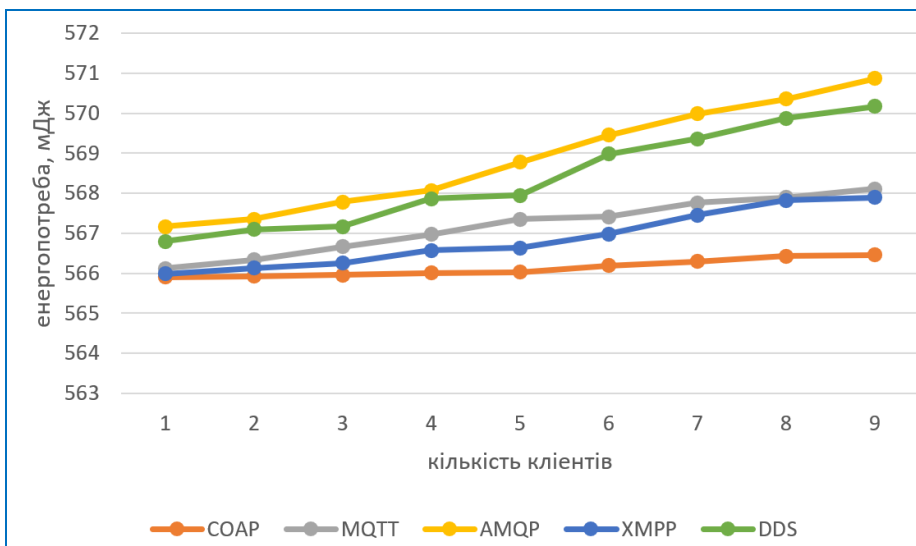


Рис. 7. Графік залежності енергопотребы від кількості клієнтів для різних протоколів

Найкращими за масштабованістю є протоколи MQTT та DDS завдяки їхній гнучкості у налаштуваннях. CoAP демонструє найвищу енергоефективність, однак зі збільшенням мережі його ефективність передачі повідомлень суттєво знижується. Але протоколи XMPP та AMQP мають високі показники енергоспоживання і недостатню гнучкість у налаштуванні швидкості передачі даних, через що вони поступаються протоколам MQTT, DDS та CoAP у здатності до масштабування.

Ефективність архітектур IoT залежить від ефективності управління, стійкості до відмов, масштабованості та затримок передачі. Ефективність управління визначає рівень можливої координації вузлів. Стійкість до відмов гарантує роботу системи навіть при виході з ладу окремих компонентів, що критично важливо для надійності.

Масштабованість дозволяє системі адаптуватися до зростання кількості пристроїв та даних, підтримуючи стабільну продуктивність. Затримки передачі впливають на швидкість реакції, яка може змінюватися з кількістю запитів до вузлів. У результаті

дослідження можна дійти висновку, що централізована архітектура забезпечила чіткий контроль через центральний сервер, що спрощує управління та обробку даних, але обмежує стійкість до відмов і масштабованість, створюючи ризик перевантаження та високих затримок у великих системах.

Децентралізована архітектура розподіляє обробку між вузлами, що підвищує автономність, стійкість і дозволяє масштабувати мережу, але може призводити до зростання затримок у великих системах через складність координації між вузлами.

Гібридна архітектура комбінує переваги обох видів, поєднуючи часткову автономність вузлів із централізованим контролем, що підвищує стійкість і забезпечує помірну масштабованість та затримки передачі, збалансовуючи навантаження на систему.

Аналіз результатів дослідження показав цікаву різницю в ефективності протоколів та архітектур. Протоколи CoAP та DDS показали низькі затримки, які мали значну тенденцію росту при збільшенні кількості пристроїв в IoT мережі, тоді як MQTT, XMPP та AMQP показали високу, але стабільну затримку.

Дослідження енергоефективності протоколів MQTT, XMPP, DDS та AMQP показали середній рівень, але вони мають високу тенденцію росту енергопотребности вузлів при збільшенні кількості пристроїв мережі. CoAP же показав найнижчий показник енергопотребности і тенденції її росту.

MQTT, DDS та CoAP мають найкращі можливості до масштабованості, тоді як XMPP та AMQP вказують на можливість підтримки меншої кількості пристроїв в мережі.

Централізована архітектура організації систем на базі IoT надає найкращий контроль над вузлами мережі, але страждає від підвищеної затримки та зниженої стійкості до відмов, тоді як децентралізована архітектура має кращу масштабованість, значну стійкість до відмов, але має складності у контролі над мережею.

Гібридна архітектура поєднує можливості обох видів, що робить її кращою за них, але вона є складнішою для налаштування.

Було детально проаналізовано протоколи та архітектури IoT, а також адаптовано до різних умов дослідження. Продуктивність обраних протоколів була перевірена за допомогою ключових метрик: ефективності передачі, енергоспоживання та масштабованості, що дозволило отримати детальну картину їх здатності працювати у реальних умовах. Для архітектур IoT було оцінено стійкість до відмов, енергоспоживання, масштабованість та затримку передачі, що є критично важливими характеристиками для забезпечення надійної роботи систем.

Висновки

В ході проведеного дослідження було ретельно підібрано умови для оцінки продуктивності сучасних протоколів та архітектур IoT. Продуктивність обраних протоколів була проаналізована за допомогою ключових метрик: ефективності передачі, енергоспоживання та масштабованості, що дозволило отримати детальну картину їх здатності працювати у приближених до реальних умовах. Для архітектур IoT було оцінено стійкість до відмов, енергоспоживання, масштабованість та затримку передачі, що є критично важливими характеристиками для забезпечення надійної роботи систем.

У результаті дослідження було запропоновано комбінований підхід використання протоколів CoAP та MQTT на гібридній архітектурі, що надає переваги у вигляді високої ефективності передачі протоколів з низьким енергоспоживанням вузлів мережі з додатковою можливістю налаштування і високою захищеністю мережі. Це рішення є ефективним для реальних застосувань у галузях розумного моніторингу, автоматизації та безпеки.

Протоколи CoAP, MQTT, AMQP, DDS та XMPP демонструють свою ефективність у задачах IoT,

де ключовими факторами є швидкість передачі даних, надійність, масштабованість і енергоефективність. Завдяки низьким вимогам до обчислювальних ресурсів, CoAP є ідеальним для пристроїв з обмеженими ресурсами, таких як датчики та контролери. Однак його основним недоліком є орієнтація на прості запити й відповідь, що обмежує його можливості в складних системах з інтенсивним обміном даними. Протоколу MQTT притаманна легкість та адаптивність до різноманітних умов. Завдяки схемі «публікації-підписки», цей протокол добре працює у додатках з обмеженою пропускною здатністю мережі, що робить його надійним вибором для систем моніторингу або управління IoT. Однак, його можливості обмежуються відсутністю гарантії доставки при зміні QoS. AMQP забезпечує високий рівень надійності та безпеки передачі даних, що робить його гарним вибором у критично важливих системах. Проте значні обчислювальні витрати обмежують його використання у системах з обмеженими ресурсами. Крім того, складність протоколу у порівнянні з MQTT може ускладнити впровадження. Протокол DDS демонструє вражаючу продуктивність для систем з низькою затримкою і великим обсягом даних. Завдяки своїй гнучкості та здатності підтримувати динамічний обмін даними в реальному часі, DDS є ідеальним для високонавантажених систем, таких як автомобільні або авіаційні мережі. Однак, його складність та високі вимоги до ресурсів обмежують використання у простих IoT-рішеннях. XMPP забезпечує ефективну комунікацію в системах обміну миттєвими повідомленнями завдяки своїй гнучкій архітектурі та підтримці розширень.

Проте через орієнтацію на текстові повідомлення та відносно високу накладну вартість, він менш ефективний у випадках передачі сенсорних даних чи обміну великими обсягами інформації. Таким чином, вибір оптимального протоколу залежить від конкретних умов та завдань.

Для простих систем із низькими вимогами до ресурсів CoAP і MQTT залишаються надійними варіантами, тоді як AMQP та DDS забезпечують кращу надійність і продуктивність для складних і критично важливих задач.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2022). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(4), 2347–2404. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>

2. Choudhary, A., Khandal, V., Choudhary, R. et al. Internet of Things: a comprehensive overview, architectures, applications, simulation tools, challenges and future directions. Discover Internet of Things, 4, 16, 2024. <https://link.springer.com/article/10.1007/s43926-024-00084-3>
3. Domínguez-Bolaño, T., Campos, O., Barral, V., Escudero, C. J. An overview of IoT architectures, technologies, and existing open-source projects. arXiv preprint arXiv:2401.15441, 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.15441>
4. Ray, P. P. (2023). A review on architectures, protocols, and standards in Internet of Things. Internet of Things, 22, 100765. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100765>
5. Sobin C. C. A Survey on Architecture, Protocols and Challenges in IoT. Wireless Personal Communications, vol. 112, no. 3, 2020, pp. 1383–1429. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07108-5>
6. Larian, H., Larian, A., Sharifi, M., Movahednejad, H. Towards Web of Things Middleware: A Systematic Review. arXiv preprint arXiv:2208.04272, 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.08456>
7. Dauda, A., Mazhar, T., Malik, M. A. et al. A Survey on IoT Application Architectures. Sensors, 24(21), 6872, 2024. <https://doi.org/10.3390/s24165320>
8. Al-Yudidharma, A., Anwar, M. F., Pratama, R. A., et al. Messaging protocols and electronic platforms used in the Internet of Things for the purpose of building smart homes: A systematic literature review. Journal of Systems Architecture, 143, 102989, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.127>
9. Al-Andoli M. N., Kumar K., Kumar A., Jaber M. M., Shah R. Dimensions of Internet of Things: Technological Taxonomy, Architecture, Applications and Open Challenges — A Systematic Review. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, Vol. 2022, 28 p. <https://doi.org/10.1155/2022/9148373>

Received (Надійшла) 06.12.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Чертанов Ярослав Валерійович – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Yaroslav Chertanov – student of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: yaroslav.chertanov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-4648-5871>;

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; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2817-9036>;

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56423229200>.

Філіппов Владлен Валерійович – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Vladlen Filippov – PhD student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: vladlen.filippov@nure.ua; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0004-2524-7840>.

Approach for selecting the protocol and architecture of the autonomous section of the IoT edge layer

Yaroslav Chertanov, Andriy Kovalenko, Vladlen Filippov

Abstract. Relevance. The rapid growth of the Internet of Things (IoT) and the need for monitoring, automation, and optimization of processes in industry, logistics, energy, transportation, and smart technologies has led to increased interest in the effective organization of network protocols. The choice of data transmission protocols and network architecture determines the performance, energy efficiency, scalability, and reliability of IoT systems, making this topic key for modern research and practical implementation. **Object of study:** protocols and architectures for organizing Internet of Things network protocols. **Purpose of the article:** to analyze and compare the effectiveness of MQTT, CoAP, AMQP, XMPP, and DDS protocols, as well as centralized, decentralized, and hybrid IoT architectures to identify satisfactory solutions for building productive and reliable Internet of Things systems. **Research results.** The paper analyzes IoT protocols according to key metrics: transmission delay, energy efficiency, and scalability. It was found that CoAP and DDS protocols provide the lowest latency, while MQTT and COAP demonstrate the best scalability. The CoAP protocol proved to be the most energy-efficient, while AMQP and XMPP showed increased resource consumption. The evaluation of IoT architectures showed that centralized architecture provides ease of management but has low fault tolerance, decentralized architecture has high reliability and scalability, and hybrid architecture has balanced latency, performance, and fault tolerance. A combined approach is proposed that combines the use of CoAP and MQTT in a hybrid architecture to improve the efficiency and adaptability of IoT systems. **Conclusions.** Modern IoT protocols and architectures have different efficiencies depending on the conditions of use. The results obtained can be used to build energy-efficient, scalable, and reliable IoT solutions in smart monitoring, automation, and security systems. The scope of application of the results obtained: industrial and domestic IoT systems, monitoring networks, automated control systems, smart cities.

Keywords: Internet of Things; IoT protocols; MQTT; CoAP; AMQP; DDS; XMPP; IoT architecture; centralized architecture; decentralized architecture; hybrid architecture; energy efficiency; scalability.

М. В. Шиман, М. В. Савченко

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

МЕТОД АНАЛІЗУ ВПЛИВУ РІЗНОРІДНОСТІ ТРАФІКУ НА ЗАТРИМКИ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Анотація. Актуальність. Сучасні телекомунікаційні системи функціонують в умовах високої різномірності мережевого трафіку, зумовленої одночасною присутністю пуасонівських, bursty- та самоподібних потоків, характерних для мультимедійних сервісів, IoT-застосунків і мереж реального часу. Класичні моделі теорії черг, що базуються на припущеннях незалежності та експоненціального розподілу міжприбуткових інтервалів, не здатні адекватно описати вплив сплесковості та довготривалої кореляції на затримки, що призводить до систематичного заниження оцінок показників якості обслуговування. Це зумовлює необхідність розроблення узагальнених методів аналізу, які враховують статистичну структуру різномірного трафіку. **Об’єкт дослідження:** процеси формування затримок у телекомунікаційних системах масового обслуговування за наявності різномірних потоків трафіку. **Мета статті:** розробка та дослідження узагальненого аналітико-експериментального методу оцінювання впливу Poisson-, bursty- та self-similar-трафіку на середню затримку в телекомунікаційних системах з урахуванням варіативності та самоподібності вхідних потоків. **Результати дослідження.** У статті запропоновано математичний підхід до аналізу затримок на основі моделі типу $G/G/1$, у якому різномірність трафіку враховується через ефективний коефіцієнт варіації міжприбуткових інтервалів та параметр Херста. Отримано аналітичні залежності, що демонструють нелінійне зростання середньої затримки зі збільшенням burstiness та ступеня самоподібності потоку. Проведено імітаційне моделювання в середовищі OMNeT++, результати якого підтвердили адекватність аналітичних оцінок і показали, що самоподібний трафік формує найбільш критичні режими роботи системи з лавиноподібним зростанням затримки при високих навантаженнях. **Висновки.** Показано, що середня затримка в телекомунікаційних системах визначається не лише інтенсивністю надходжень, а й статистичною структурою трафіку. Bursty- та самоподібні потоки істотно погіршують показники QoS навіть за незмінної середньої інтенсивності, що обмежує застосовність класичних пуасонівських моделей. Запропонований метод забезпечує точніше прогнозування затримок і може бути використаний для аналізу та проєктування високонавантажених телекомунікаційних мереж. Сфера використання отриманих результатів: безпроводні та дротові телекомунікаційні мережі, системи Інтернету речей, мультисервісні мережі нового покоління, задачі аналізу QoS і оптимізації дисциплін обслуговування.

Ключові слова: телекомунікаційні система, різномірний трафік, теорія черг, самоподібність, параметр Херста, затримка, QoS.

Вступ

Постановка проблеми. Сучасні телекомунікаційні системи функціонують в умовах високої різномірності мережевого трафіку, що зумовлено появою широкого спектра сервісів – від традиційної передавання даних до мультимедійних потоків, IoT-сегментів і хмарних застосунків. У таких системах одночасно циркулюють потоки різної статистичної природи: регулярні, стохастично рівномірні, bursty-процеси з вираженими сплесками інтенсивності, а також самоподібні потоки, що характеризуються довготривалою кореляцією і важкими хвостами розподілів. Наявність цих компонент значно ускладнює аналіз поведінки вузлів мережі, оскільки класичні моделі, заставані на пуасонівських припущеннях, не здатні адекватно відтворити вплив фрактальності та варіативності міжприбуткових інтервалів на затримки. Унаслідок цього виникає потреба у методах, що враховують реальні характеристики трафіку та дозволяють оцінювати показники якості обслуговування з урахуванням неоднорідності потоків.

Актуальність роботи визначається тим, що різномірність трафіку істотно впливає на ключові параметри якості обслуговування, зокрема на середню затримку, довжину черги, імовірність перевантаження та стійкість мережевих вузлів до пікових навантажень. Самоподібні та bursty-потоки стають характерною рисою сучасних мереж, оскільки вони при-

таманні відеостримінгу, соціальним платформам, сервісам реального часу й IoT-пристроєм, які генерують дані нерівномірно та часто корельовано. Ігнорування цих властивостей призводить до недооцінки реальних значень затримок і неправильної оцінки пропускної здатності, що особливо критично для мереж високого завантаження. Наукові дослідження останніх років підтверджують, що вплив фрактальності трафіку може бути домінуючим чинником у формуванні затримок, однак комплексного методу оцінювання цього впливу, який би інтегрував Poisson-, bursty- та self-similar-компоненти, досі не сформовано. Саме тому розроблення узагальненого методу аналізу впливу різномірності трафіку на показники QoS є актуальним завданням для телекомунікаційних систем нового покоління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У класичних підходах до аналізу мережевого трафіку основою виступають моделі на базі пуасонівського процесу, які передбачають незалежність міжприбуткових інтервалів та експоненціальний характер надходжень [1-2]. Такі моделі добре описують системи з рівномірними потоками, однак втрачають точність при появі нерегулярності або корельованості у трафіку [3-4]. Подальший розвиток теорії привів до моделей On/Off-типу, які дозволяють відтворити bursty-поведінку через чергування фаз високої та низької активності [3, 5]. Ці моделі дають змогу оцінювати вплив сплескових навантажень на черги, однак не

можуть відобразити довготривалу кореляцію, що властива реальному інтернет-трафіку.

Наступним кроком стало використання марковських модульованих потоків (ММРР), які дозволяють налаштувати кореляційні властивості та відповідати широкому спектру статистичних профілів вхідного трафіку [6, 7]. Проте навіть ММРР-моделі виявилися недостатніми для опису явища самоподібності. Значний внесок у розуміння цього явища зробили дослідження, які довели, що мережевий трафік демонструє властивості фрактальності, які неможливо пояснити пуасонівськими моделями [8-11]. Самоподібні потоки характеризуються параметром Херста і мають властивість довготривалої залежності, що призводить до різкого збільшення дисперсії на великих часових інтервалах та спричиняє суттєве зростання затримок у чергах. Саме тому сучасні моделі прагнуть поєднати класичні пуасонівські підходи з моделями, що враховують burstiness та самоподібність, однак єдиної узагальненої методики для оцінювання впливу різнорідності трафіку на затримку сьогодні не існує.

Метою роботи є розроблення узагальненого аналітико-експериментального методу оцінювання впливу різнорідних типів трафіку на середню затримку в телекомунікаційних системах на основі аналізу структурних характеристик Poisson-, bursty- та self-similar-потоків. Досягнення цієї мети передбачає виявлення фундаментальних залежностей між варіативністю міжприбуткових інтервалів, ступенем самоподібності та поведінкою системи чергування. У межах дослідження необхідно сформулювати математичні співвідношення, які описують вхідний трафік з урахуванням його кореляційних властивостей, побудувати універсальну модель черги, що дозволяє оцінювати середню затримку для різних класів потоків, а також виконати модельні експерименти для порівняння аналітичних оцінок із результатами симуляції. Підсумковим етапом є визначення впливу окремих параметрів – коефіцієнта варіації, параметра Херста, інтенсивності On/Off-фаз – на величину затримки, що дозволить окреслити області поведінки системи, де різнорідність трафіку має критичне значення.

Основний матеріал

Математичний метод аналізу впливу різнорідності трафіку на затримки. Для коректного оцінювання впливу різнорідних потоків на затримку в телекомунікаційних системах необхідно сформулювати узагальнену математичну модель вхідного трафіку, яка охоплює Poisson-потоки, bursty-потоки та самоподібні фрактальні потоки. Розпочнемо з фундаментального представлення процесу надходжень. Нехай $A(t)$ – кількість заявок, що надійшли в систему до моменту часу t . Тоді середня інтенсивність визначається як

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\mathbb{E}[A(t)]}{t}. \quad (1)$$

Для пуасонівської компоненти приймається, що міжприбуткові інтервали X_k незалежні та експоненційно розподілені:

$$X_k \sim \text{Exp}(\lambda_p), \quad \mathbb{E}[X_k] = 1/\lambda_p. \quad (2)$$

Цей випадок характеризується найбільшою “регулярністю” процесу, адже коефіцієнт варіації

$$C_v^{(P)} = 1. \quad (3)$$

Для bursty-потоків використаємо двохстанну модель On/Off-типу, де під час On-фази інтенсивність надходжень λ_{on} є значно вищою від фонові, що приводить до появи трафікових “сплесків”. Нехай тривалості фаз мають математичні сподівання

$$\mathbb{E}[T_{on}] = \frac{1}{\alpha}, \quad \mathbb{E}[T_{off}] = \frac{1}{\beta}. \quad (4)$$

Стационарна частка часу, коли система перебуває в активній фазі, становить

$$p_{on} = \frac{\beta}{\alpha + \beta}. \quad (5)$$

Тоді середня інтенсивність bursty-потоків дорівнює

$$\lambda_B = p_{on} \lambda_{on}. \quad (6)$$

Для фрактальної компоненти введемо самоподібний процес із параметром Херста H . Самоподібність відображається співвідношенням

$$X(at) = da^H X(t), \quad (7)$$

що означає інваріантність статистичної структури щодо масштабування. Одним із ключових наслідків цього є нелінійний ріст дисперсії:

$$\text{Var}[A(t)] \sim t^{2H}. \quad (8)$$

Фактично це означає, що для $H > 0.5$ у потоці присутня довготривала залежність (long-range dependence), яка посилює виникнення пікових навантажень. Сумарний різнорідний вхідний потік є таким:

$$\lambda_{tot} = \lambda_p + \lambda_B + \lambda_F, \quad (9)$$

де λ_F – середня інтенсивність фрактального процесу, оцінена з реального або синтезованого трафіку. Хоч сама фрактальність не змінює середнього значення λ_F , вона істотно збільшує варіативність надходжень, що ми відобразимо через коефіцієнт варіації міжприбуткових інтервалів:

$$C_v^2 = \text{Var}[X] / (\mathbb{E}[X])^2. \quad (10)$$

Для фрактальних потоків відома апроксимація

$$C_v^{(F)} \approx \frac{1}{2H-1}, \quad (11)$$

що показує, як зменшення H до 0.5 різко збільшує варіативність процесу.

Для аналізу затримок використовуємо модель типу $G/G/1$, де час обслуговування має моменти

$$\mathbb{E}[S], \quad \mathbb{E}[S^2]. \quad (12)$$

Класична апроксимація Поллачека–Хінчина для середнього часу очікування у черзі має вигляд

$$\mathbb{E}[W_q] = \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \frac{C_a^2 + C_s^2}{2} \cdot \mathbb{E}[S], \quad (13)$$

$$\text{де } \rho = \lambda_{tot} \mathbb{E}[S], \quad (14)$$

$$\text{та } C_a^2 = C_v^2, \quad (15)$$

є коефіцієнтами варіації вхідних інтервалів.

З формули (13) безпосередньо випливає, що на затримку впливають два основні фактори: інтенсивність (через ρ) та варіативність (через C_a^2). Саме тому для різномірних потоків важливо розглядати не тільки середню інтенсивність, а й статистичну структуру надходжень, яка значною мірою визначає “нерівність” трафіку. Для bursty-потоків коефіцієнт варіації можна оцінити як

$$C_v^{(B)} \approx \frac{\lambda_{on}}{\lambda_B} > 1, \quad (16)$$

що математично формалізує здатність такого процесу генерувати “сплески”.

Для сумарного різномірного трафіку з 3 компонент отримаємо ефективний коефіцієнт варіації

$$C_{a,eff}^2 = w_P C_v^{(P)2} + w_B C_v^{(B)2} + w_F C_v^{(F)2}, \quad (17)$$

де ваги визначаються часткою кожного потоку:

$$w_i = \lambda_i / \lambda_{tot}. \quad (18)$$

Підставивши (17) у (13), одержуємо

$$\mathbb{E}[W_q] = \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \frac{C_{a,eff}^2 + C_s^2}{2} \cdot \mathbb{E}[S]. \quad (19)$$

Цей вираз і є ключем до оцінювання впливу різномірності на затримку. Він показує, що навіть за незмінної середньої інтенсивності λ_{tot} , збільшення фрактальності або burstiness неминуче веде до росту затримки. Оскільки фрактальні потоки з параметром H мають властивість “концентрувати” навантаження у важких хвостах розподілу, затримка набуває наближеного вигляду

$$\mathbb{E}[W_q] \sim \frac{1}{(1-\rho)^{2H}}, \quad (20)$$

що демонструє їхній нелінійний вплив на систему при наближенні до границі стабільності $\rho \rightarrow 1$.

У багатьох практичних випадках корисно оцінювати також середній час перебування пакета у системі:

$$\mathbb{E}[W] = \mathbb{E}[W_q] + \mathbb{E}[S], \quad (21)$$

а через інтенсивність надходжень отримуємо середню довжину черги

$$\mathbb{E}[L] = \lambda_{tot} \mathbb{E}[W]. \quad (22)$$

Разом (19)–(22) формують завершений інструментарій для кількісної оцінки QoS у системах, де присутня різномірність вхідного трафіку, bursty-ефекти та фрактальні властивості.

Експериментальне дослідження впливу різномірності трафіку на затримку. Для підтвердження аналітичних результатів, наведених у математичному розділі, було проведено комплексне експериментальне дослідження за допомогою симуляційного середовища OMNeT++. Головною метою експериментів стало визначення того, як змінюється середня за-

тримка в системі масового обслуговування типу $G/G/1$ під впливом різних характеристик вхідного трафіку – зокрема інтенсивності, коефіцієнта варіації міжприбуткових інтервалів та параметра Херста, що визначає ступінь самоподібності потоку. Для цього було синтезовано три типи потоків: пуасонівський, bursty-потік On/Off-типу та самоподібний трафік, змодельований на основі MMPP-процесу. Усі потоки надходили до одного вузла обслуговування, який мав сталий час обслуговування та політику черги типу FIFO, що дозволяло досліджувати саме вплив структури вхідного потоку, а не особливостей дисципліни обслуговування.

Перший етап дослідження був спрямований на аналіз впливу коефіцієнта варіації міжприбуткових інтервалів C_v^2 на середню затримку $\mathbb{E}[W_q]$ за незмінної середньої інтенсивності надходжень. Для цього було синтезовано серію потоків із однаковим значенням λ , але зі зростаючим рівнем варіативності – від пуасонівського випадку ($C_v^2 = 1$) до сильно bursty- та фрактально-корельованих потоків ($C_v^2 \approx 20$). Експериментально встановлено, що при збільшенні варіативності затримка зростає нелінійно, суттєво випереджаючи оцінки класичних моделей типу $M/M/1$. Ця тенденція повністю узгоджується з формулою (13), де саме коефіцієнт варіації є множником, який підсилює вплив навантаження на середню затримку. Отримані результати наведено на рис. 1.

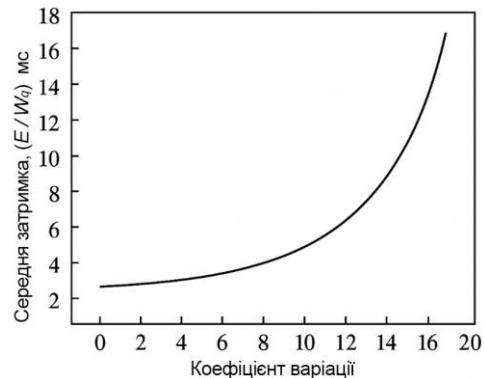


Рис. 1. Залежність середньої затримки від коефіцієнта варіації міжприбуткових інтервалів

Другий етап експериментів був присвячений дослідженню впливу ступеня самоподібності трафіку, що описується параметром Херста H . Для серії сценаріїв генерувався трафік зі зростанням H від 0.5 (границя відсутності довготривалої залежності) до 0.95 (розвинена самоподібність). Результати показали, що навіть за однакової інтенсивності та збереженого середнього часу обслуговування середня затримка реагує на збільшення H різко й нелінійно: при $H > 0.75$ спостерігається суттєвий стрибок значень $\mathbb{E}[W_q]$. Така поведінка відповідає теоретичному наближенню (20), згідно з яким фрактальні процеси формують значно важчі хвости розподілу й призводять до появи “сплескових” навантажень, що спричинюють високі затримки. Графічне відображення цієї залежності подано на рис. 2.

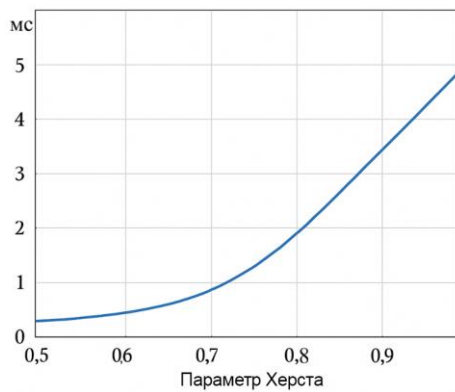


Рис. 2. Середня затримка залежно від параметра Херста

На третьому етапі проведено порівняння трьох типів трафіку – Poisson, Bursty та Self-similar – за умови однакової середньої інтенсивності надходжень. Це дозволило оцінити, наскільки природа трафіку впливає на поведінку системи при зміні навантаження ρ . Результати експерименту показали, що пуасонівський потік формує найнижчі значення середньої затримки в усьому діапазоні навантажень, а bursty-трафік призводить до приблизно дворазового збільшення затримки, особливо за $\rho > 0.6$.

Найбільш критичною є поведінка самоподібного трафіку: при значеннях ρ , близьких до 0.8, затримка зростає лавиноподібно, що узгоджується з ефектом довготривалої кореляції та важких хвостів. Усі три залежності наведено на рис. 3.

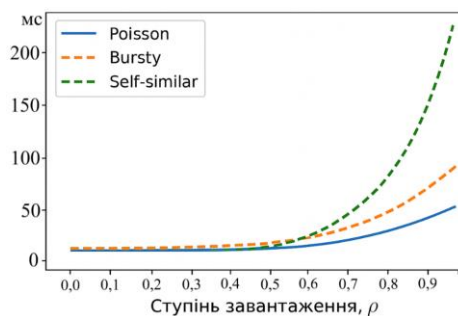


Рис. 3. Порівняння затримки для Poisson, Bursty та Self-similar трафіку при однаковій інтенсивності

Сукупні результати усіх трьох експериментальних серій підтверджують ключові теоретичні положення: затримка в телекомунікаційній системі визначається не лише середньою інтенсивністю потоку, а передусім статистичною структурою вхідного трафіку. Bursty-та самоподібні процеси формують значно вищі коефіцієнти варіації, що виявляється у зростанні затримок навіть при помірних навантаженнях. Отже, моделі, які ігнорують різномірність і кореляційність трафіку, систематично недооцінюють реальні затримки, особливо у системах із високим трафіковим навантаженням.

Висновки

У ході виконаного дослідження отримано комплексні аналітичні та експериментальні результати щодо впливу різномірності трафіку на затримку в телекомунікаційних системах. Проведений аналіз підтвердив, що середня затримка визначається не лише інтенсивністю потоку, але значною мірою залежить від статистичної структури міжприбуткових інтервалів і характеру варіативності надходжень. Показано, що пуасонівські потоки формують найменші значення затримки завдяки своїй регулярності, тоді як bursty-потоки з вираженими сплесками інтенсивності спричиняють суттєве збільшення середнього часу очікування навіть при помірних навантаженнях. Найбільш критичний вплив спостерігається у випадку самоподібного трафіку, для якого наявність довготривалої кореляції призводить до формування важких хвостів розподілу та різкого росту затримки в областях навантаження, близьких до граничних.

Експериментальні результати, отримані у середовищі OMNeT++, узгоджуються з аналітичними оцінками та підтверджують нелінійний характер зростання затримки при збільшенні коефіцієнта варіації міжприбуткових інтервалів і параметра Херста. Збільшення фрактальності вхідного потоку підсилює ефект накопичення черги, що демонструє суттєве відхилення від прогнозів класичних моделей $M/M/1$ і $M/G/1$, у яких не враховується корельована природа навантаження. Встановлено, що навіть за однакової середньої інтенсивності різні типи трафіку формують принципово різні режими затримки, а самоподібний потік може збільшувати її у кілька разів порівняно з пуасонівським випадком.

Отримані результати дозволяють дійти висновку, що адекватне оцінювання показників якості обслуговування у сучасних телекомунікаційних системах потребує врахування неоднорідності трафіку та його кореляційних властивостей. Запропонований підхід, який поєднує аналітичну модель із симуляційною перевіркою, забезпечує можливість точнішої оцінки затримок у вузлах мережі, де присутні Poisson-, bursty- та self-similar-потоки. Це створює основу для подальшої оптимізації алгоритмів керування навантаженням, удосконалення дисциплін обслуговування та підвищення точності прогнозування QoS у системах нового покоління.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Jin W.-L. Introduction to Network Traffic Flow Theory: Principles, Concepts, Models, and Methods. Elsevier. 2021. P. 3-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815840-1.00011-4>
2. H. J. Fowler, W. E. Leland. Local area network characteristics, with implications for broadband network congestion management. *IEEE J. on Selected Areas in Com.* 1991. Vol. 9, no. 7. P. 1139-1149. DOI: <https://doi.org/10.1109/49.103559>

3. R. R. Marie, J. M. Blackledge, H. E. Bez. On the fractal characteristics of Internet network traffic and its utilization in covert communications. *2009 International Conference for Internet Technology and Secured Transactions, (ICITST)*, London, UK, 2009. P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICITST.2009.5402542>
4. C. -H. Wei, G. Bianchi, R. -G. Cheng. Modeling and Analysis of Random Access Channels With Bursty Arrivals in OFDMA Wireless Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2015. Vol. 14, no. 4. P. 1940-1953. DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2014.2377121>
5. Smiesko J., Kontsek M., Bachrata K. Markov-Modulated On–Off Processes in IP Traffic Modeling. *Mathematics*. 2023. Vol. 11(14):3089. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11143089>
6. El Fawal A.H., Mansour A., Nasser A. Markov-Modulated Poisson Process Modeling for Machine-to-Machine Heterogeneous Traffic. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(18):8561. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14188561>
7. Joshua Landon, Süleyman Özekici, Refik Soyer. A Markov modulated Poisson model for software reliability. *European Journal of Operational Research*. 2013. Vol. 229, no. 2. P. 404-410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.03.014>
8. Компанієць В. О., Пустовойтов П.С. Модель масштабування мережі на основі стохастичних процесів за умов самоподібного трафіку. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Т. 36 (75), № 3. С.71-79. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/10>
9. Компанієць В. О., Пустовойтов П. С. Стохастичний метод аналізу джитера на основі згортки гіперекспоненційних розподілів при самоподібному трафіку. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 355, № 4. С. 213-220. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-32>
10. Пустовойтов П. С., Компанієць В. О. Метод формування самоподібного потоку із заданим параметром Херста для моделювання трафіку в мережі. *Технічна інженерія*. 2024. № 2(94). С. 185-190. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-185-190](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-185-190)
11. Компанієць В.О., Пустовойтов П.С. Метод математичного моделювання самоподібного трафіку у інфокомунікаційних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава, НУ ПП, 2025. Т. 4 (78). С. 187-189. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.187>

Received (Надійшла) 18.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Шиман Максим Вячеславович – аспірант кафедри системи інформації ім. В.О. Кравця, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

Maksym Shyman – PhD Student, Department of Information Systems named after V. O. Kravets, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Maksym.Shyman@infiz.khpi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0007-4978-460X>;

Савченко Микола Володимирович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри системи інформації ім. В.О. Кравця, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна;

Mykola Savchenko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Information Systems named after V. O. Kravets, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Mykola.Savchenko@khpi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0005-7366-3213>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7101640966>.

Method for analyzing the impact of traffic diversity on delays in telecommunication systems

Maksym Shyman, Mykola Savchenko

Abstract. Relevance. Modern telecommunication systems operate in conditions of high heterogeneity of network traffic, caused by the simultaneous presence of Poisson, bursty and self-similar flows, typical for multimedia services, IoT applications and real-time networks. Classical models of queuing theory, based on the assumptions of independence and exponential distribution of inter-return intervals, are unable to adequately describe the impact of burstiness and long-term correlation on delays, which leads to systematic underestimation of service quality indicators. This necessitates the development of generalized analysis methods that take into account the statistical structure of heterogeneous traffic. **Object of research:** processes of delay formation in telecommunication mass service systems in the presence of heterogeneous traffic flows. **Purpose of the article:** development and study of a generalized analytical and experimental method for assessing the impact of Poisson-, bursty- and self-similar-traffic on the average delay in telecommunication systems, taking into account the variability and self-similarity of incoming flows. **Research results.** The article proposes a mathematical approach to delay analysis based on a G/G/1 type model, in which traffic heterogeneity is taken into account through the effective coefficient of variation of inter-return intervals and the Hurst parameter. Analytical dependencies were obtained, demonstrating a nonlinear increase in the average delay with increasing burstiness and the degree of self-similarity of the flow. Simulation modeling was carried out in the OMNeT++ environment, the results of which confirmed the adequacy of analytical estimates and showed that self-similar traffic forms the most critical operating modes of the system with an avalanche-like increase in delay at high loads. **Conclusions.** It is shown that the average delay in telecommunication systems is determined not only by the intensity of arrivals, but also by the statistical structure of traffic. Bursty and self-similar flows significantly worsen QoS indicators even at a constant average intensity, which limits the applicability of classical Poisson models. The proposed method provides more accurate delay prediction and can be used for the analysis and design of highly loaded telecommunication networks. The scope of application of the obtained results: wireless and wired telecommunication networks, Internet of Things systems, next-generation multi-service networks, problems of QoS analysis and optimization of service disciplines.

Keywords: telecommunications system, heterogeneous traffic, queueing theory, self-similarity, Hurst parameter, delay, QoS.

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Андрусенко Ю. О.	35	Зарічний Я. С.	77	Пироженко С. С.	95
Антонова І. В.	126	Захарченко Р. В.	18	Підлісний Я. А.	163
Баленко О. І.	51	Іващенко Г. С.	40	Піняєв Є. В.	69
Барковська О. Ю.	135	Ільїна І. В.	86	Поворознюк А. І.	99
Бедрик М. О.	182	Карачун А. В.	163	Поворознюк О. А.	99
Білик А. С.	168	Кислиця С. Г.	18	Порошенко А. І.	177
Бірук Я. І.	142	Клівець С. І.	82	Пустовойтов П. Є.	186
Бондаренко М. Е.	40	Коваленко А. А.	224	Радченко В. О.	35
Боряк Б. Р.	18	Козлігін О. О.	168	Раптанов Д. А.	135
Булах Б. В.	45	Костяк М. Ю.	198	Руденко О. А.	58
Бурдейна Н. Б.	153	Кравченко П. О.	69	Савченко М. В.	231
Бурдейний Б. В.	163	Краснянський Г. Ю.	153	Сапожников К. М.	168
Васильєв Є. А.	25	Криворот А. І.	25	Севостьянова О. М.	214
Васильєв О. С.	25	Криховецький Г. Я.	82	Сиволовський І. М.	206
Васильченко О. С.	177	Кулешова Т. В.	82	Синявський О. Ю.	198
Васюта В. Б.	182	Лашко Є. Є.	157	Скородєлов В. В.	31
Васюта В. В.	182	Левченко Л. О.	163	Сукач С. В.	173
Воронець В. М.	186	Леві Л. І.	202	Суровицький М. М.	214
Воронець О. М.	186	Лисечко В. П.	206	Тиртишний Д. А.	107
Гавриленко С. Ю.	31	Ліпчанський М. В.	51	Філімончук Т. В.	214
Галінський Д. О.	12	Лозко О. В.	206	Філіппов В. В.	224
Гейко Г. В.	122	Макаренко В. С.	192	Фомін О. С.	202
Гейко М. В.	31	Максимов Д. М.	135	Холєв В. О.	177
Гірянський Б. П.	45	Марюшко М. В.	5	Челак В. В.	113
Главчев М. І.	51	Набока С. В.	62	Челак Є. В.	122
Главчева Ю. М.	51	Ні Я. С.	135	Ченчева О. О.	173
Глива В. А.	148	Ніколаєв К. Д.	168	Чертанов Я. В.	224
Головко Г. В.	58	Носков В. І.	31	Чікіна Н. О.	126
Горностаєв О. А.	113	Олейнічук В. В.	86	Шабатура Т. В.	148
Гук А. С.	95	Олексієнко Д. Р.	202	Шефер О. В.	18
Двірна О. А.	62	Панченко В. І.	90	Шиман М. В.	231
Дрозд О. Ю.	192	Партика С. О.	214	Шостак А. В.	131
Дрючко О. Г.	18	Пастушенко В. В.	206	Шостак М. В.	177
Дураченко Г. Ф.	25	Патерега Ю. І.	148	Янковський О. А.	86
Єрошенко О. А.	69	Пащенко Р. Е.	5	Яровий В. В.	135
Запорожець О. В.	192	Пивоварова Д. І.	69	Ярошевич Р. О.	177

Наукове видання

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць

Випуск 1 (83)

Відповідальний за випуск *О. В. Шефер*Ідентифікатор медіа R30-04135 згідно з рішенням Національної ради України
з питань телебачення і радіомовлення від 25.04.2024 № 1416Підписано до друку 20.02.2026. Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 29,5. Тираж 120 прим. Зам. 220-26
Адреса редакції: Україна, 36011, м. Полтава, проспект Віталія Грицаєнка, 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